



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

# **ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE CENICAFÉ**

**CRISTIAN DAVID SABOGAL ESCOBAR**

Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura,  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Manizales, Colombia.

© 2017, Cristian Sabogal Escobar

# **ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE CENICAFÉ**

**Cristian David Sabogal Escobar**

Tesis de Profundización presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Eléctrica**

**Director:**

Ing. Camilo Younes Velosa

Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura,

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Manizales, Colombia.

Enero, 2017

*A mi padre quien sin importar  
las circunstancias siempre quiso y  
me dio lo mejor para poder llegar a  
ser un ingeniero, y a mi madre  
quien siempre ha estado conmigo  
guiándome por el camino del bien.*

*A Uri y Gabo por todo el apoyo  
y paciencia que me brindaron  
durante el desarrollo de mi  
Posgrado.*

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia, a mis padres, mi hermana y a todos y a cada uno de todos los miembros que la componen, porque de todos obtuve apoyo incondicional, además de una fe inmensa en mis capacidades lo cual me permitió siempre seguir con la motivación suficiente y con el convencimiento total de que cumpliría la meta que me propuse.

Al Centro Nacional de Investigaciones de Café – CENICAFÉ por el tiempo y la disposición para permitirme realizar mis estudios durante mi permanencia en la empresa.

A mi profesor Camilo por todo el apoyo que me dio sobre todas las circunstancias.

## RESUMEN

Esta tesis ofrece al lector el estudio del sistema eléctrico de la empresa Cenicafé – FNC, que aporta herramientas y metodologías de análisis y simulación, para llevar a cabo un estudio básico del desempeño y comportamiento de su sistema de distribución, aportando a la mejora de la confiabilidad y disponibilidad de su suministro de energía eléctrica

**Palabras claves:** Sistema eléctrico de Potencia, Confiabilidad, disponibilidad, modelado y simulación, Análisis de estado estable y Transitorio.

## THESIS: Performace Analysis of electrical power system of Cenicafé

### Abstract

This thesis presents a study of the electric system in Cenicafé – FNC Enterprise. Which provides tools and methods of modeling, analysis and simulation, in order to develop a basic study of the performance of the electrical distribution system, improving the reliability and availability of the electrical power supply

**Keywords:** Electrical Power System, reliability, availability, modeling and simulation of, stable and transient state analysis.

## Tabla de Contenido

LISTADO DE FIGURAS.....	X
LISTADO DE TABLAS.....	XII
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO 1    MODELADO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.....	2
1.1    MODELO DE LA FUENTE.....	2
1.2    MODELO DE LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN.....	4
1.2.1    PARÁMETRO RESISTIVO .....	4
1.2.2    PARÁMETRO INDUCTIVO Y REACTANCIA INDUCTIVA.....	5
1.3    MODELO DEL TRANSFORMADOR [5] .....	7
1.3.1    Transformador Ideal .....	8
1.3.2    Modelo Transformador Real .....	9
1.3.3    Transformador Trifásico .....	10
1.4    MODELO DE LA CARGA [2] .....	12
1.4.1    Carga Instalada ( $CI$ ).....	12
1.4.2    Capacidad Instalada ( $PI$ ) .....	13
1.4.3    Demanda ( $D(t)$ ) .....	13
1.4.4    Demanda Máxima ( $D_m$ ) .....	13
1.4.5    Demanda Promedio ( $D_p$ ) .....	13
1.4.6    Curva de Carga .....	13
1.4.7    Demanda Diversificada.....	14
1.4.8    Máxima Demanda Diversificada .....	15
1.4.9    Demanda Máxima no coincidente .....	16
1.4.10    Factor de Diversidad.....	16
1.4.11    Factor de Demanda ( $F_D$ ).....	17
1.4.12    Factor de Utilización ( $F_U$ ) .....	17
1.4.13    Factor de Potencia .....	18
1.4.14    Tipos de Modelo de Carga.....	18
CAPITULO 2    ANÁLISIS DE ESTADO ESTABLE Y ESTADO TRANSITORIO DEL SISTEMA DE POTENCIA ELÉCTRICO 33 kV DE CENICAFE.....	19
2.1    OBJETIVO GENERAL .....	19
2.2    OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19

<b>2.3</b>	<b>HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN</b>	<b>19</b>
<b>2.4</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA [6]</b>	<b>19</b>
<b>2.5</b>	<b>MODELO EQUIVALENTE SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA 33 kV</b>	<b>22</b>
2.5.1	Red Equivalente Subestación Chinchiná	22
2.5.2	Línea de Distribución 33 kV	24
2.5.3	Transformador 33 kV / 13.2 kV	29
2.5.4	Carga Equivalente	29
<b>2.6</b>	<b>SIMULACIÓN Y RESULTADOS</b>	<b>34</b>
2.6.1	Simulación de Estado Estable	34
2.6.2	Simulación de Estado Transitorio	37
<b>CAPITULO 3</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE CARGAS A NIVEL DE 208 V.</b>	<b>40</b>
<b>3.1</b>	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>40</b>
<b>3.2</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>40</b>
<b>3.3</b>	<b>HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS</b>	<b>40</b>
<b>3.4</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b>	<b>40</b>
<b>3.5</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>41</b>
<b>3.6</b>	<b>DESARROLLO</b>	<b>44</b>
3.6.1	EDIFICIO 1	44
3.6.2	EDIFICIO 2	51
3.6.3	EDIFICIO 3	60
3.6.4	RESUMEN DE RESULTADOS	69
<b>CAPITULO 4</b>	<b>ANÁLISIS DE ESTADO ESTABLE Y ESTADO TRANSITORIO DEL SISTEMA DE POTENCIA ELÉCTRICO 13.2 kV DE CENICAFE</b>	<b>70</b>
<b>4.1</b>	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>70</b>
<b>4.2</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>70</b>
<b>4.3</b>	<b>HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN</b>	<b>70</b>
<b>4.4</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA 13.2 kV [6]</b>	<b>70</b>
<b>4.5</b>	<b>MODELO EQUIVALENTE SISTEMA DE 13.2 kV</b>	<b>73</b>
4.5.1	LINEA DE DISTRIBUCIÓN 13.2 kV	73
4.5.2	TRANSFORMADORES 13.2 / 0.208 kV	79
4.5.3	CARGAS EQUIVALENTES DE LADO DE BAJA	80
<b>4.6</b>	<b>SIMULACIÓN Y ANÁLISIS</b>	<b>80</b>
4.6.1	Simulación de Estado Estable	80



4.6.2	Simulación de Estado Transitorio.....	82
<b>CAPITULO 5</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>84</b>
5.1	CAPÍTULO 2 .....	84
5.2	CAPÍTULO 3 .....	84
5.3	CAPÍTULO 4 .....	86
5.4	DIFICULTADES DEL DESARROLLO .....	88
5.5	OPORTUNIDADES Y TRABAJOS FUTUROS.....	89
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	.....	<b>91</b>

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1. Subestación de Distribución Sencilla [1] .....	3
Figura 1-2. Equivalente Thévenin Fuente.....	3
Figura 1-3. Campo Magnético alrededor de un conductor. [1] .....	5
Figura 1-4. Línea Monofásica formada por dos conductores. [1] .....	6
Figura 1-5. Representación del Transformador. a) Representación básica del transformador. b) Representación esquemática del transformador ideal. [5] .....	8
Figura 1-6. Modelo Equivalente Real. a) Equivalente Transformador de potencia. b) Equivalente con resistencias y reactancias referidas. c) Circuito con corriente magnetizante despreciable. [5] ..	9
Figura 1-7. Representación del transformador trifásico [5].....	10
Figura 1-8. Conexiones Transformador trifásico a) Y-Y b) Y- $\Delta$ c) $\Delta$ -Y d) $\Delta$ - $\Delta$ [5] .....	12
Figura 1-9. Curva de Carga Diaria Típica (Usuario Industrial) .....	14
Figura 1-10. Curva de demanda Diaria a) Usuario 1. b) Usuario 2. c) Usuario 3. d) Usuario 4. [2] ...	15
Figura 1-11. Curva de demanda diversificada. [2] .....	15
Figura 1-12. Demanda Máxima no Coincidente [2] .....	16
Figura 1-13. Factor de Diversidad Vs. No. de Usuarios [2].....	17
Figura 2-1. Diagrama Unifilar Sistema Eléctrico de CENICAFÉ .....	20
Figura 2-2. Seccionador Principal Línea 33 kV.....	21
Figura 2-3. Red y Apoyos Línea de 33 kV .....	21
Figura 2-4. Subestación 33/13.2 kV Cenicafe.....	22
Figura 2-5. Equivalente Thevenin S/E Chinchiná.....	23
Figura 2-6. Equivalente Línea Corta [1] .....	24
Figura 2-7. Sistema Trifásico Alineado .....	25
Figura 2-8. Curva Típica de Demanda Cenicafe.....	31
Figura 2-9. Túnel de Proyección de Demanda .....	32
Figura 2-10. Circuito Equivalente red 33 kV NEPLAN.....	34
Figura 2-11. Simulación E.E red 33 kV Caso Base.....	35
Figura 2-12. Simulación E.E red 33 kV escenario Bajo en 2017 .....	36
Figura 2-13. Simulación E.E red 33 kV escenario Medio en 2017 .....	36
Figura 2-14. Simulación E.E red 33 kV escenario Alto en 2017 .....	37
Figura 2-15. Circuito Equivalente Red 33 kV ATP.....	38
Figura 2-16. TRV en Terminales de Seccionador.....	38
Figura 2-17. Magnitud TRV Fase C .....	39
Figura 3-1. Triangulo de Potencias Eléctricas.....	42
Figura 3-2. Descomposición de Onda Distorsionada .....	43
Figura 3-3. Celda de Carga Edificio 1 .....	45
Figura 3-4. Formas de Onda de tensión y corriente Edf. 1 .....	46
Figura 3-5. Curva de Demanda Edf. 1.....	47
Figura 3-6. THD de Tensión Edf. 1 .....	48
Figura 3-7. THD de Corriente Edf. 1 .....	49
Figura 3-8. Tensiones y Corrientes de fase Edf. 2 .....	52
Figura 3-9. Forma de Onda de Tensión y Corriente Edf. 2 .....	52

Figura 3-10. Potencia Aparente Vs. Ocurrencia Edf. 2 .....	53
Figura 3-11. F.P Vs. Ocurrencia Edf. 2 .....	54
Figura 3-12. Curva de Demanda Edf. 2.....	55
Figura 3-13. Perfil de Demanda Edf. 2.....	55
Figura 3-14. THD de Tensión Edf. 2 .....	56
Figura 3-15. THD de Corriente Edf. 2 .....	57
Figura 3-16. THD Corriente L2 Vs. Ocurrencia Edf. 2 .....	58
Figura 3-17. Tensión y Corriente de Fase Edf. 3.....	61
Figura 3-18. Formas de Onda Tensión y Corriente Edf. 3 .....	61
Figura 3-19. Potencia Aparente Vs. Ocurrencia Edf. 3 .....	62
Figura 3-20. FP Vs. Ocurrencia Edf. 3 .....	63
Figura 3-21. Curva de Demanda Edf. 3.....	64
Figura 3-22. THD de Tensión Edf. 3 .....	65
Figura 3-23. THD de Corriente Edf. 3 .....	66
Figura 3-24. THD Corriente Neutro vs Ocurrencia Edf. 3 .....	67
Figura 4-1. Red de Distribución 13.2 kV .....	71
Figura 4-2. Subestación 33/13.2 kV .....	72
Figura 4-3. Circuitos Redes de Distribución 13.2 kV .....	73
Figura 4-4. Diagrama de Distancias Líneas 13.2 kV.....	74
Figura 4-5. Modelo Equivalente NEPLAN S.P.E Completo.....	81
Figura 4-6. Modelo Equivalente ATP S.E.P Completo .....	82
Figura 4-7. Simulación E.T Red Completa .....	83

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1-1. Resistencia CA de conductores de aluminio ACSR a 60 Hz .....	5
Tabla 2-1. Características Generales Conductor ACSR 2/0 AWG [4].....	24
Tabla 2-2. Distancias entre Conductores .....	25
Tabla 2-3. Resistencia Directa y Alterna par Conductores de ACSR 2/0 [4].....	25
Tabla 2-4. RMG Conductor ACSR Quail [4].....	26
Tabla 2-5. DMG y Reactancia Inductiva por tipo de Estructura .....	26
Tabla 2-6. DMG y Reactancia Secuencia 0 por estructura .....	28
Tabla 2-7 Curva de demanda Mes de Septiembre 2014.....	30
Tabla 2-8. P, Q, S y FP máx, mín y promedio Sep 2014 .....	31
Tabla 2-9. Porcentaje de Variación de Demanda proyectada.....	32
Tabla 2-10. Escenarios de demanda próximos años .....	33
Tabla 2-11. Resumen Elementos Simulación Neplan Red 33 kV (Caso base) .....	35
Tabla 2-12 Resumen Elementos Simulación ATP Red 33 kV .....	37
Tabla 3-1. Registro de Potencias Edf. 1 .....	46
Tabla 3-2. Demanda Máx, Mín (P y S) Edf. 1 .....	47
Tabla 3-3. THD Corriente Edf. 1.....	49
Tabla 3-4. Registro de Potencias Edf. 2.....	53
Tabla 3-5. Demanda Máx. Mín (P y S) Edf. 2 .....	56
Tabla 3-6. THD de Tensión y Corriente AVG. Máx y Mín Edf. 2 .....	57
Tabla 3-7. Registro de Potencias Edf. 3.....	62
Tabla 3-8. Demanda Máx. Mín (P y S) Edf. 3 .....	64
Tabla 3-9. THD de Tensión y Corriente AVG, Máx y Mín Edf. 3 .....	66
Tabla 3-10. Modelo de Cargas Edf. 1, 2 y 3 .....	69
Tabla 4-1. Características Generales Conductor ACSR 2 AWG [4] .....	74
Tabla 4-2. Resistencia Directa y Alterna par Conductores de ACSR 2 [4] .....	75
Tabla 4-3. RMG Conductor ACSR 2 AWG [4] .....	76
Tabla 4-4. Transformador Edf. 1 (PlanAlto).....	79
Tabla 4-5. Transformador Edf. 2 (PlanAlto).....	79
Tabla 4-6. Transformador Edf. 3 (PlanAlto).....	79
Tabla 4-7. Transformador Beneficio Agrícola (La Granja) .....	79
Tabla 4-8. Transformador Oficinas (La Granja) .....	79
Tabla 4-9. Cargas Equivalentes lado de baja tensión.....	80
Tabla 4-10. Resumen Resultados Estado Estable Caso Base Modelo 13.2 kV .....	81
Tabla 4-11 Resumen Resultados Estado Estable Variante Modelo 13.2 kV.....	81
Tabla 5-1. P y FP S/E Cenicafé Modelos Capítulos 2 y 4.....	87

## INTRODUCCIÓN

Con el creciente aumento en el uso de cargas no lineales (procedentes de la electrónica de potencia) en el sector industrial, se han empezado a tener problemas sobre las instalaciones eléctricas debido a que éstos generan a partir de formas de onda sinusoidales y con la frecuencia de la red, otras ondas de diferentes frecuencias ocasionando el fenómeno conocido como “componentes armónicos de tensión y corriente”. Este efecto está causando problemas sobre las instalaciones eléctricas con lo que anteriormente las redes eléctricas no contaban, como los son: sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas por el neutro, resonancias entre los elementos del circuito y en generar al deterioro de la calidad del suministro de la energía eléctrica.

Por esto, a través de la Ingeniería Eléctrica se tienen herramientas de modelado y simulación de sistemas eléctricos, que permiten a las industrias, a través de la medición de sus parámetros eléctricos como tensión, corriente, frecuencia, armónicos, puestas a tierra, etc. evaluar el estado de su sistema eléctrico en cuanto a confiabilidad, disponibilidad y calidad, con la capacidad de determinar los focos y alternativas de trabajo que les permitirían tener un mejor desempeño en sus instalaciones eléctricas, reduciendo costos en pérdidas y mantenimiento en sus equipos, y obteniendo una mayor eficiencia energética de su sistema.

Esta tesis es el resultado final del estudio del desempeño del sistema eléctrico de potencia de Cenicafé, que se ha desarrollado para obtener el título de Magister en Ingeniería Eléctrica, aprovechando la relación laboral del autor de la Tesis con Cenicafé y la oportunidad de dedicar actividades laborales a recopilar, registrar y analizar toda la información para así lograr este estudio.

En el capítulo 1 se realiza una recopilación teórica sobre el modelado de sistemas eléctricos de potencia, enfocado en los elementos básicos como lo son: Equivalente del operador de red (O.R), líneas de distribución, transformadores y cargas de usuarios industriales. El objetivo de esta sección es determinar la base teórica para realizar los modelos equivalentes del sistema eléctrico de potencia.

El capítulo 2, tiene como objetivo modelar el sistema eléctrico de media tensión de Cenicafé, hasta la subestación de 33/13.2 kV, analizando la demanda del usuario como una carga centralizada definida de acuerdo con la información que se cuenta del operador de la red. Con este modelo base, se hace un estudio de estado estable donde se determina la capacidad de la red a futuras expansiones en diversos escenarios de demanda, y además, se hace un estudio de estado transitorio, donde se pretende evidenciar el efecto transitorio de desconexión no controlada de cargas, que se produce al realizar una apertura sobre el seccionador de media tensión que energiza la red de 33 kV de Cenicafé.

Sabiendo que la mayor parte de las cargas de Cenicafé son cargas de tipo no lineal y teniendo en cuenta las implicaciones técnicas sobre los sistemas eléctricos de corriente alterna que estos producen, en el Capítulo 3 se realiza la caracterización de las cargas de los edificios 1, 2 y 3 de Cenicafé, mediante el registro y análisis de las variables eléctricas, enfocadas en el entorno de

calidad de la energía, sobre una base de tiempo suficiente para determinar cuál es el modelo equivalente de las cargas y las oportunidades que se tienen sobre estas en cuanto a armónicos, bajo factor de potencia y desbalanceo de cargas.

Con el fundamento teórico del capítulo 1, el equivalente de la red de 33 kV encontrado en el capítulo 2 y las cargas equivalentes determinadas en el Capítulo 3. El capítulo 4 reúne todos estos estudios sobre un modelo equivalente completo del sistema eléctrico de Cenicafé hasta el nivel de baja tensión de 208 V, donde a través de herramientas de simulación, se evalúa el desempeño del sistema en estado estable y estado transitorio, sobre un caso crítico de demanda.

En el capítulo 5 se analizan los resultados encontrados en los capítulos 2, 3 y 4, se concluye las problemáticas, estado actual de la red de Cenicafé y las recomendaciones técnicas para mejorar el desempeño del sistema, y se realiza una crítica constructiva sobre las barreras que se tuvieron durante el desarrollo de esta tesis y los trabajos futuros que podrían llevarse a cabo no solo sobre Cenicafé sino sobre empresas con características similares, que pueden ser útiles para mejorar las condiciones de disponibilidad, confiabilidad y continuidad del sus sistemas eléctricos.

Esta tesis ofrece al lector herramientas métodos de análisis y simulación, para llevar a cabo un estudio básico sobre el desempeño y comportamiento de su sistema de distribución, para tomar decisiones de inversión, que mejoren la confiabilidad y disponibilidad de su suministro de energía eléctrica.

## MODELADO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Los sistemas de distribución son el enlace directo entre el usuario y el sistema de potencia, es por esto que estos requieren altos niveles de confiabilidad y desempeño para asegurar la disponibilidad de energía al cliente, de forma continua, estable y con los niveles de calidad de la potencia adecuados. Por ello (Con esta motivación), las áreas investigativas de la rama de Ingeniería Eléctrica, busca modelar los elementos de los sistemas de transformación y distribución

De tal forma que se pueden implementar herramientas de simulación para evaluar aspectos tales como:

- Análisis de Cortocircuito (Fallas).
- Análisis de Estado Estable.
- Análisis de Estado Transitorio.
- Desempeño de las líneas ante descargas atmosféricas.
- Confiabilidad.
- Entre otros.

En este capítulo se trata de dar un breve repaso de cómo modelan los elementos del caso de estudio y como se encuentra una aproximación de los elementos que lo conforman, apoyado de los conceptos en [1], [2] y [3].

## MODELO DE LA FUENTE

La fuente puede considerarse como los elementos de generación (Centros de generación) o transformación (Subestaciones) que entregan energía a la red de distribución. Para el caso de estudio, la única fuente del sistema sería la S/E Chinchiná 115/33 kV que energiza la red de distribución de BuenCafé Liofilizado, que a su vez se conecta con la red de Cenicafé.

Una subestación que distribuye energía a uno o más alimentadores de forma radial como se ve en la Figura 0-1, lo componen los siguientes elementos.

- Interruptores de Alta y de baja: Cuya función principal en alta es aislar la Subestación de sistema de transmisión y en baja es desenergizar las cargas de los alimentadores primarios.
- Transformador de Tensión: Es el centro de la S/E y se encarga de reducir o aumentar los niveles de tensión a los adecuados para la red de distribución.
- Regulador de Tensión: Encargado de ajustar los niveles de tensión al valor nominal, cuando la carga varía y produce caídas de tensión.
- Medidores: cada subestación tiene un sistema de medición donde se presenta información como tensiones, corrientes, frecuencia, potencia, etc.

Para una subestación sencilla como se presenta anteriormente, la aproximación más adecuada sería por medio de una Equivalente Thévenin visto desde la carga, cuando se cumplan los siguientes criterios:

- Ante la ocurrencia de una falla de cortocircuito, el comportamiento será el aumento de la corriente y el decremento de la tensión. Por lo cual la potencia de la fuente es constante y fija.
- La fuente cuenta con una impedancia interna que representa las pérdidas de energía del sistema. Ésta impedancia sería la impedancia Thévenin.

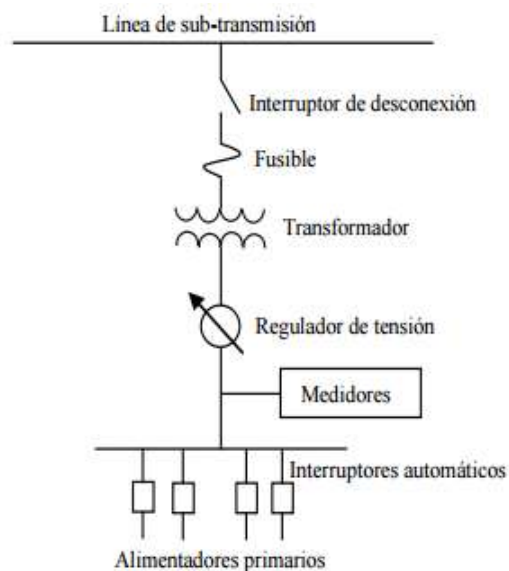


Figura 0-1. Subestación de Distribución Sencilla [1]

Para el equivalente de la Figura 0-2,  $E_0$  corresponde a la tensión nominal de la fuente (Tensión de circuito abierto),  $Z_{gen}$  es la impedancia de Thévenin (Relación  $V_{oc}/I_{sc}$ ) y  $V_s$  que resulta siendo la tensión entregada a la carga.

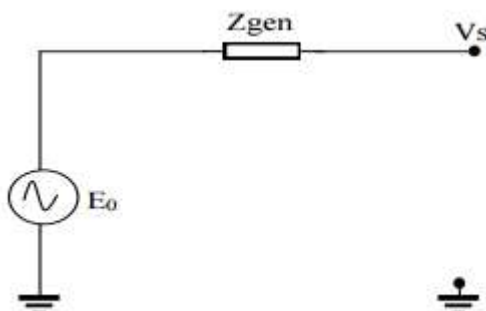


Figura 0-2. Equivalente Thévenin Fuente



## MODELO DE LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN

Las líneas de distribución pueden modelarse como un sistema con parámetros:

- **Resistivos:** Producto de las propiedades resistivas de los conductores, ya sea en cobre o aluminio, que se manifiestan con pérdidas de energía eléctrica que se convierte en calor.
- **Inductivos:** Que se dan cuando se crean flujos magnéticos variables alrededor del conductor, debido a la corriente que circula por este.
- **Capacitivos:** producidos por el efecto que se da de campo eléctrico entre los conductores de la red.

Sin embargo, con fines prácticos, los modelos simplifican los cálculos de los parámetros dependiendo de la longitud de las líneas. Las líneas se pueden considerar como:

- Líneas Cortas
- Líneas Medias.
- Líneas Largas.

Para el caso de estudio la línea a modelar es de distribución, por lo cual solo se profundiza sobre el sistema equivalente de líneas cortas, en los cuales solo se consideran los efectos de Resistencia e Inductancia de los conductores. Los parámetros de una línea corta se calculan de la siguiente forma.

### PARÁMETRO RESISTIVO

Las propiedades resistivas de los conductores están directamente relacionadas con sus materiales de fabricación, sección transversal, temperatura y longitud de las líneas. El parámetro resistivo en las líneas de distribución se manifiesta como la pérdida de energía eléctrica que es disipada en calor y produce una caída de tensión sobre el sistema.

Teniendo en cuenta que son demasiadas las variables que influyen sobre la resistencia de los conductores eléctricos, y que esto hace complicado el cálculo de este parámetro, existen tablas diseñadas incluso por los fabricantes, que presentan el valor de resistencia CA a 60 Hz y temperaturas típicas de operación para el material del conducto usado.

En la Tabla 0-1 [4] se presentan las resistencias a la corriente alterna 60 Hz de los conductores de aluminio ACSR empleado usualmente en las redes de distribución aéreas.

Tabla 0-1. Resistencia CA de conductores de aluminio ACSR a 60 Hz

Calibre AWG o MCM	No de Hilos		Resistencia CA a 60 Hz		
	AC	Al	25 °C	50 °C	75 °C
6	1	6	2.149	2.448	2.684
4	1	6	1.353	1.565	1.717
2	1	6	0.853	1.012	1.108
1	1	6	0.667	0.811	0.890
1/0	1	6	0.537	0.654	0.716
2/0	1	6	0.426	0.530	0.580
3/0	1	6	0.339	0.429	0.470
4/0	1	6	0.270	0.3659	0.383
266.8	7	26	0.214	0.235	0.256
300	7	30	0.196	0.217	0.237
336.4	7	30	0.168	0.185	0.201
397.5	7	30	0.142	0.157	0.171
477	7	30	0.119	0.130	0.142
500	7	30	0.11	0.122	0.133

## PARÁMETRO INDUCTIVO Y REACTANCIA INDUCTIVA

Debido a la corriente alterna que fluye a través del conductor, se forma un campo magnético alrededor de éste, que a su vez origina flujos magnéticos que se enlazan con los demás conductores del circuito, este efecto sobre el conductor se conoce como Inductancia.

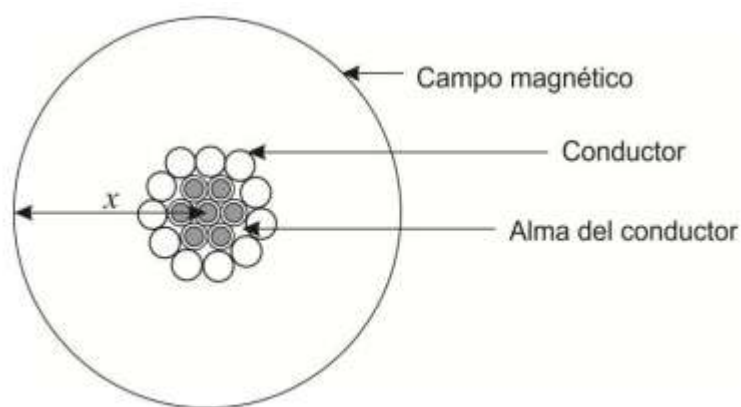


Figura 0-3. Campo Magnético alrededor de un conductor. [1]

Debido a que el objetivo de este estudio no es profundizar sobre los conceptos y demostraciones de los cálculos de flujo interno, externo y enlaces con demás conductores, solo se ahondará sobre

el caso de la Figura 0-4, que corresponde a un circuito monofásico en donde la fase X y su retorno Y están compuestas por  $n$  y  $m$  conductores respectivamente.

Donde se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los conductores están compuestos con un grupo de conductores dispuestos geoméricamente en paralelo.
- La corriente total del conductor, está distribuida uniformemente entre los  $n$  y  $m$  conductores que lo componen.

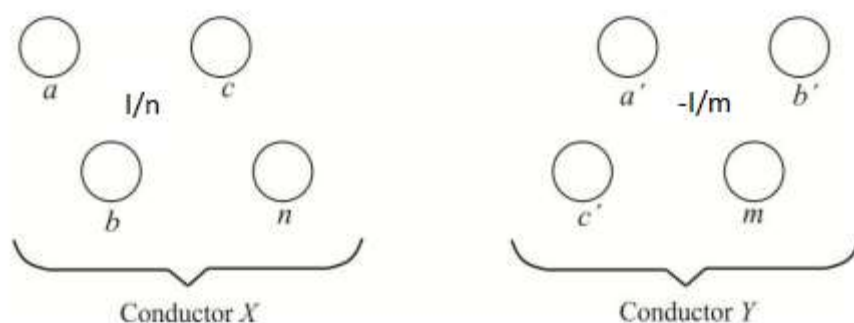


Figura 0-4. Línea Monofásica formada por dos conductores. [1]

$$L_X = 2 \times 10^{-7} \frac{DMG}{RMG} \text{ H/m}$$

0-1

Donde

$DMG$ : Distancia media geométrica entre X y Y.

$RMG$ : Radio medio geométrico del conductor X.

La inductancia total de la línea monofásica se calcularía como:

$$L = L_X + L_Y$$

0-2

Donde  $L_Y$  se calcula de forma similar a  $L_X$ .

Con la idea de comprender a que corresponden los valores de  $DMG$  y  $RMG$  se resumen los conceptos en los siguientes términos

### Radio Medio Geométrico

El *RMG* es el promedio geométrico de las distancias entre conductores de un mismo grupo, en términos más claros, es la distancia existente entre los hilos de un mismo conductor; y se calcula dependiendo de la cantidad de hilos del conductor y el radio físico de los hilo.

### Distancia Media Geométrica

La Distancia media geométrica se conoce como la “Media geométrica de las distancias de un punto a cada uno de los otros puntos considerados”. Y se calcula teniendo en cuenta la disposición y distancia entre los conductores de fase.

Nota: Para mayor profundidad sobre los cálculos de *RMG* y *DMG*, el lector puede remitirse a la bibliografía de [1].

### Reactancia Inductiva

Para cálculos de líneas de distribución se pretende conocer el valor de resistencia que produce el parámetro de la inductancia, conocida como reactancia inductiva. Este valor depende de la frecuencia del sistema y se obtiene de:

$$X_L = 2\pi fL \quad 0-3$$

Reemplazando  $L$  por el equivalente de la suma de la inductancia interna y externa para una frecuencia de  $f = 60 \text{ Hz}$  se obtiene:

$$X_L = 2\pi \cdot 60 \cdot 2 \times 10^{-7} \ln \frac{DMG}{RMG} \frac{\Omega}{m} \quad 0-4$$

Pasando a términos de logaritmos decimales

$$X_L = 0.173 \log \frac{DMG}{RMG} \frac{\Omega}{km} \quad 0-5$$

### MODELO DEL TRANSFORMADOR [5]

El transformador es un elemento de transferencia entre los generadores y las líneas de distribución, su función principal es reducir o aumentar el nivel de tensión en el lado secundario a través del principio de inducción electromagnética. Los transformadores básicamente pueden considerarse como: a. Elevadores, cuando el nivel de tensión del secundario es mayor que el primario (comúnmente usado en plantas de generación) y reductor, cuando el nivel de tensión del secundario es menor que la del primario (usados al final de una línea de transmisión o distribución y Subestaciones).

En un transformador reductor el nivel de tensión del secundario disminuye y la corriente aumenta, cuando se tiene un elevador, el efecto es el contrario. La potencia del primario como del secundario se mantienen iguales (Sin considerar Pérdidas del núcleo), al igual que los ángulos de las tensiones y corrientes.

### Transformador Ideal

En un transformador ideal, se desprecian las pérdidas eléctricas y está formado por el devanado primario (entrada), el devanado secundario (salida) y el núcleo donde se tienen las espiras de los devanados.

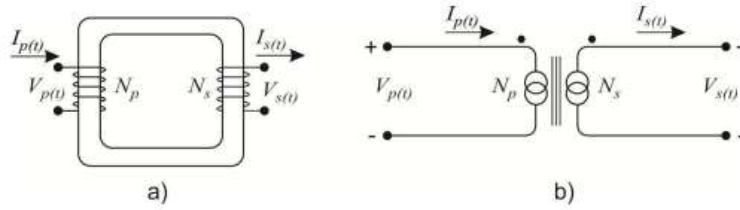


Figura 0-5. Representación del Transformador. a) Representación básica del transformador. b) Representación esquemática del transformador ideal. [5]

La relación de transformación que define al transformador está definida por el número de vueltas de los devanados de la siguiente forma:

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad 0-6$$

En términos fasoriales

$$\frac{V_p}{V_s} = a \quad 0-7$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{1}{a} \quad 0-8$$

Donde:

$V_p, I_p, N_p$  son respectivamente la Tensión, Corriente y Número de vueltas del devanado primario.

$V_s, I_s, N_s$  son respectivamente la Tensión, Corriente y Número de vueltas del devanado secundario.

La potencia del transformador ideal se calcula a través de:

$$P_{primario} = V_p I_p \cos \theta_p \quad 0-9$$

$$P_{\text{secundario}} = V_s I_s \cos \theta_s \quad 0-10$$

Donde los ángulos del primario y secundario son obtenidos de la impedancia de los devanados primario y secundario respectivamente.

Considerando que en un transformador ideal no existen pérdidas entonces:

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} \quad 0-11$$

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s} \quad 0-12$$

Sustituyendo las ecuaciones 0-9 y 0-10 en 0-11 y 0-12 se tiene que:

$$Z_p = a^2 Z_s \quad 0-13$$

### Modelo Transformador Real

Para un circuito equivalente real se consideran las pérdidas eléctricas del transformador (a diferencia del ideal), como lo son la resistencia y reactancia de los devanados primario y secundario y las pérdidas producidas por los fenómenos de histéresis y corrientes parásitas, comúnmente conocidas como pérdidas en el hierro del transformador.

En la Figura 0-6 se presentan los modelos equivalentes reales a) Equivalente Real, b) Equivalente agrupando las impedancias de los devanados ( $I_m \ll I_1$ ) y c) despreciando la rama de magnetización.

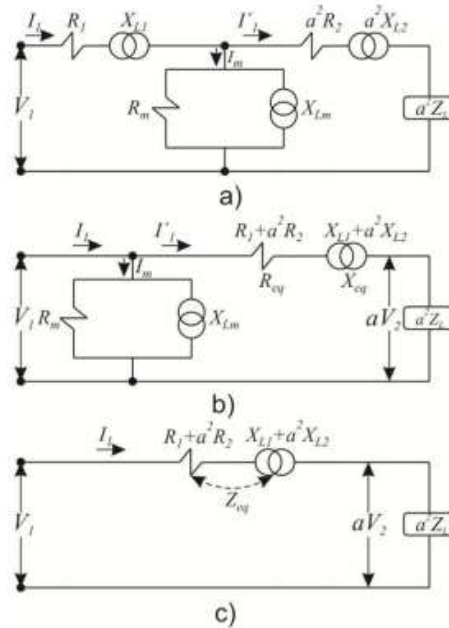


Figura 0-6. Modelo Equivalente Real. a) Equivalente Transformador de potencia. b) Equivalente con resistencias y reactancias referidas. c) Circuito con corriente magnetizante despreciable. [5]

La Impedancia equivalente del transformador sería entonces.

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{Leq} \quad 0-14$$

Donde

$$R_{eq} = R_p + a^2 R_s \quad 0-15$$

$$X_{Leq} = X_{Lp} + a^2 X_{Ls} \quad 0-16$$

Donde

$R_p, X_{Lp}$  y  $R_s, X_{Ls}$  corresponden a la resistencia y reactancia inductiva del devanado primario y secundario, y  $Z_{eq}, R_{eq}, X_{Leq}$  son la impedancia, resistencia y reactancia inductiva equivalentes referidas al primario.

La eficiencia del transformador ( $\eta$ ) es determinada con la relación entre la potencia que entrega el transformador (secundario) y de la potencia originada por las pérdidas en el núcleo, así:

$$\eta = \frac{P_s}{P_s + P_{perdidas}} \times 100\% \quad 0-17$$

$$\eta = \frac{V_s I_s \cos \theta_s}{V_s I_s \cos \theta_s + [P_{\text{Pérdidas en el hierro}} + I^2 R_{es}]} \times 100\% \quad 0-18$$

### Transformador Trifásico

Un transformador trifásico puede considerarse como un grupo de tres transformadores monofásicos idénticos. Sin embargo, su fabricación se hace instalando tres devanados primarios y tres devanados secundarios sobre el mismo núcleo Figura 0-7.

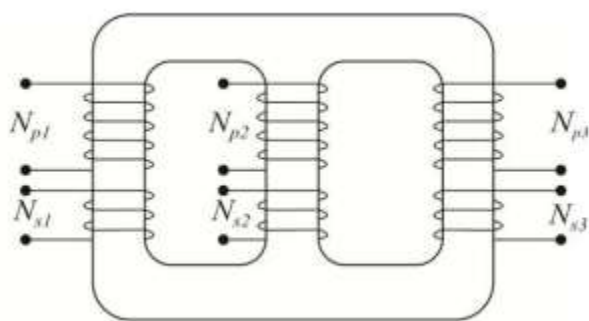


Figura 0-7. Representación del transformador trifásico [5]

El transformador trifásico es altamente usado en los sistemas de transmisión y distribución por su alta eficiencia y posibilidades de conexión en sus devanados. Las posibles conexiones de los devanados en un transformador trifásico son:

- Estrella – Estrella (Y-Y): En esta conexión, la tensión de fase del devanado primario ( $V_{\phi p}$ ) está definida por la ecuación 0-19, mientras que la tensión de línea por la ecuación 0-20. La principal ventaja de esta conexión es que se tiene un punto común entre devanados que puede ser conectado a tierra, además de poder tener dos diferentes niveles de tensión.

$$V_{\phi p} = \frac{V_{Lp}}{\sqrt{3}} \quad 0-19$$

$$\frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi p}}{\sqrt{3}V_{\phi s}} = a \quad 0-20$$

- Estrella – Delta (Y-Δ): Comúnmente implementada en transformadores reductores. En su devanado primario se tienen los niveles de tensión de fase y de línea, existiendo un punto común de los devanados que puede ser conectado a tierra, a diferencia del devanado secundario donde no existe punto común de conexión, por lo cual, solo se tiene tensión de línea ( $V_{Ls}$ ) que es igual a la tensión de fase ( $V_{\phi}$ ). La relación para este tipo de conexión es:

$$\frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi p}}{V_{\phi s}} = \sqrt{3}a \quad 0-21$$

- Delta – Estrella (Δ-Y): Este tipo de conexión es utilizada para satisfacer cargas monofásicas a través de circuitos trifásicos. Las tensiones de fase y de línea del primario son iguales, mientras que los voltajes del lado secundario están relacionados por  $V_{Ls} = \sqrt{3}V_{\phi s}$ , debido al punto común existente entre sus devanados. Su relación de voltajes se obtiene mediante.

$$\frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{V_{\phi p}}{\sqrt{3}V_{\phi s}} = \frac{\sqrt{3}}{a} \quad 0-22$$

- Delta – Delta (Δ-Δ): Este tipo de conexión permite mantener equilibrada la tensión trifásica en condiciones de carga no equilibradas. En una conexión delta-delta no existe tensión de fase por el hecho que no hay punto de conexión común entre sus devanados, sin embargo, es común considerar la igualdad entre las tensiones de fase y de línea.

$$V_{Lp} = V_{\phi p} \text{ y } V_{Ls} = V_{\phi s} \quad 0-23$$

$$\frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{V_{\phi p}}{V_{\phi s}} = a \quad 0-24$$

En la Figura 0-8 se presentan los diferentes tipos de conexión de los devanados de un transformador trifásico.



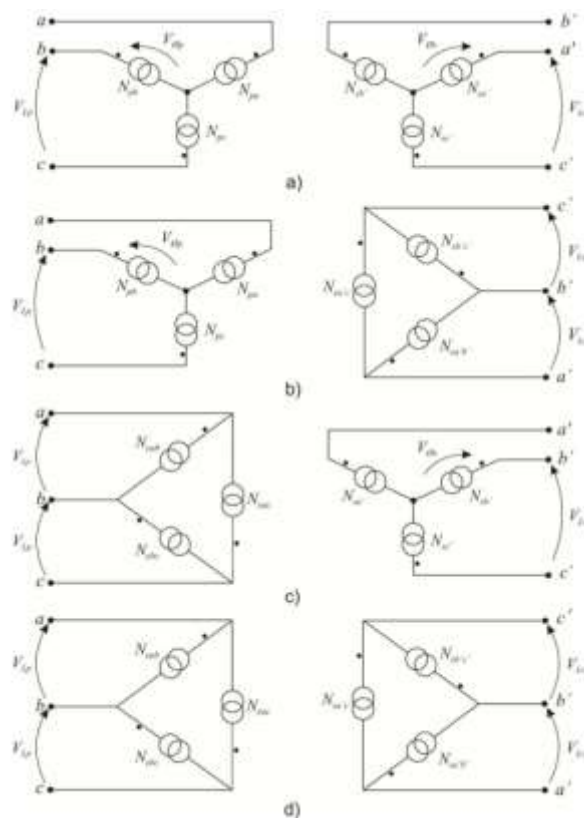


Figura 0-8. Conexiones Transformador trifásico a) Y-Y b) Y-Δ c) Δ-Y d) Δ-Δ [5]

## MODELO DE LA CARGA [2]

El análisis y modelado de sistemas de potencia eléctrico depende directamente de la naturaleza de las cargas, para un estudio de estado estable donde se quiere conocer los flujos de potencia, las cargas realmente no se comportan de forma estable, las cargas en un sistema eléctrico varían con el tiempo y dependen de variables como el tipo de usuario (residencia o industrial), día, temporada del año y las estaciones climáticas.

La carga para un usuario individual o un grupo de usuarios de un sistema de distribución está cambiando constantemente, cada vez que un usuario enciende o apaga un equipo, la carga vista por el sistema de distribución varía. Los términos que se definen a continuación dan un contexto para tratar de describir el comportamiento y naturaleza de las cargas.

### Carga Instalada (CI)

Es la sumatoria de las potencias nominales de los equipos conectados a una red eléctrica. Está expresado en kVA, MVA, kW o MW.

### Capacidad Instalada ( $PI$ )

La capacidad instalada en un sistema de distribución sería la sumatoria de las potencias nominales de los elementos que proveen de potencia eléctrica a las cargas, tales como son los transformadores o generadores. Se puede considerar que es la capacidad nominal del sistema.

### Demanda ( $D(t)$ )

Es la cantidad de potencia usada por una carga/usuario en un instante de tiempo. En una curva de demanda, los intervalos de tiempo pueden ajustarse a las necesidades del estudio, por ejemplo, para un intervalo seleccionado de 15 minutos la demanda sería el promedio de la potencia consumida de ese intervalo. Entre más pequeño sea el intervalo de tiempo mayor será la precisión con que se determina la demanda de la carga.

### Demanda Máxima ( $D_m$ )

La demanda máxima es el valor más grande de demanda que ocurre dentro de un tiempo específico. La demanda máxima puede estar clasificada en intervalos de período como minutos, horas, días, semanas o meses. La demanda máxima puede considerarse como una fuente importante de información para la ingeniería de diseño

### Demanda Promedio ( $D_p$ )

Corresponde a la carga promedio consumida sobre un período específico (día, semana, mes, etc). Se calcula mediante.

$$D_p = \frac{\text{Energía consumida en } T \text{ (kWh)}}{T \text{ en } h} \quad 0-25$$

### Curva de Carga

La curva de carga puede definirse en curva diaria, mensual o anual y cuya forma representa la variación de la demanda en el intervalo de tiempo. Las curvas de carga varían su forma de onda dependiendo de su predominancia residencia, comercial o industrial.

En la Figura 0-9 se presenta la curva de carga diaria típica para un usuario industrial, en el gráfico se pueden observar claramente los conceptos de demanda ( $D(t)$ ), Demanda promedio ( $D_p$ ), Demanda máxima ( $D_m$ ), Capacidad Instalada ( $PI$ ) y Carga Instalada ( $CI$ ).



Figura 0-9. Curva de Carga Diaria Típica (Usuario Industrial)

### Demanda Diversificada

La demanda diversificada es la suma de las demandas impuestas por un grupo de usuarios sobre el mismo sistema de potencia (Generador, Subestación, Transformador) y en el mismo período de tiempo.

Con la suma de todos los usuarios del sistema de potencia, se define el comportamiento de la curva de carga diaria del sistema. Por ejemplo, si un transformador tiene 4 usuarios con curvas de demanda diaria como se muestra en la Figura 0-10, se puede observar que el comportamiento de sus consumos es diferente y pueden existir puntos de coincidencia en horas donde la demanda del transformador puede aumentar considerablemente.

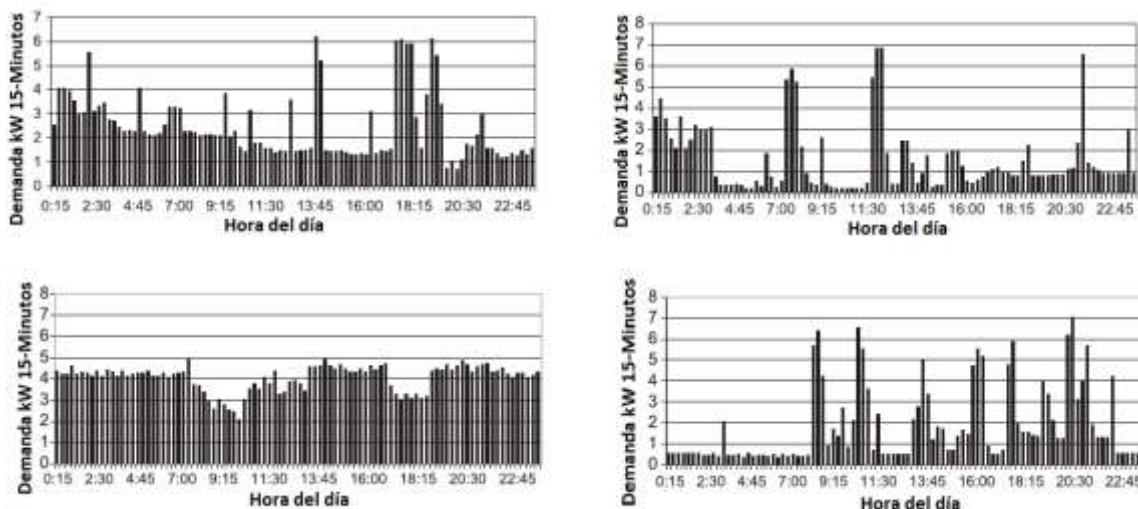


Figura 0-10. Curva de demanda Diaria a) Usuario 1. b) Usuario 2. c) Usuario 3. d) Usuario 4. [2]

La suma de los 4 usuarios equivaldría a la forma de curva diaria de la Figura 0-11 que corresponde a la demanda diversificada.

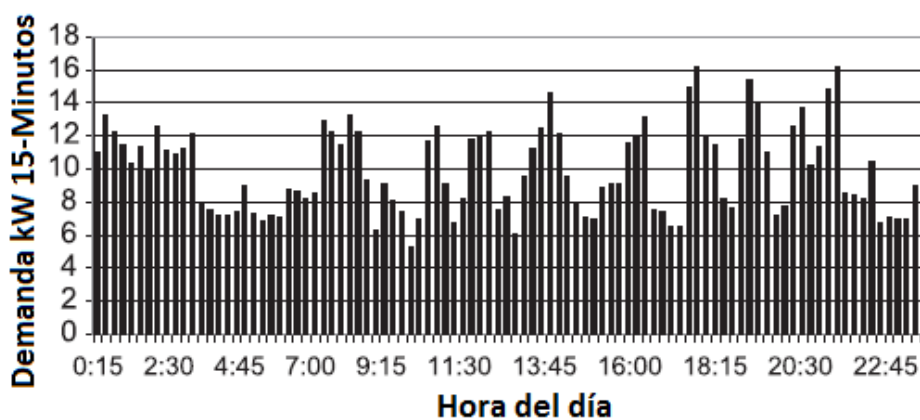


Figura 0-11. Curva de demanda diversificada. [2]

### Máxima Demanda Diversificada

En un sistema con múltiples usuarios conectados a la red de potencia, donde los hábitos de consumo que tienen estos son muy diferentes entre ellos, no puede solo considerarse la demanda máxima (de la curva de demanda) como el valor determinante para el cálculo del alimentador de este

sistema, si no, que debe entrar en juego la diversidad de demanda máxima que tiene cada uno de éstos usuarios y que no coincidirá en el mismo instante de tiempo para todos los usuarios.

En la Figura 0-11 demuestra como la combinación de las curvas de carga de diferentes usuarios suaviza los cambios extremos que tienen las cargas individuales. La máxima demanda diversificada se encuentra a las 17:30 horas, donde el valor de demanda alcanza los 16.2 kW, se puede notar que la máxima demanda de la red no ocurre en el mismo instante de tiempo que ocurre la demanda máxima de los usuarios individuales, ni tampoco su magnitud corresponde a la suma de las demandas máximas de cada usuario.

### Demanda Máxima no coincidente

La demanda máxima no coincidente de un día es la suma de las demandas máximas de un grupo de clientes de la misma red. Este valor correspondería a la máxima demanda que soportaría el sistema si el instante de tiempo en el cual se dan estas demandas, es el mismo para todos los usuarios.

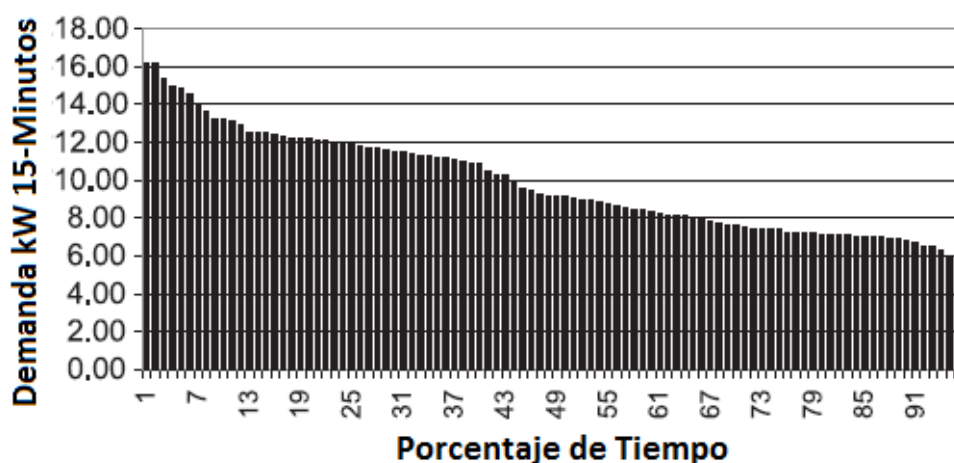


Figura 0-12. Demanda Máxima no Coincidente [2]

### Factor de Diversidad

Considerando que la demanda máxima de un grupo de usuarios no coincide temporalmente entre ellos, el factor de diversidad permite encontrar una relación de la demanda máxima no coincidente y la demanda máxima diversificada de un grupo de usuarios.

$$F_{Div} = \frac{\text{Demanda máxima No coincidente}}{\text{Demanda máxima diversificada}} \quad 0-26$$

$$F_{Div} = \frac{\sum_{i=1} D_{mi} = D_{m1} + D_{m2} + D_{m3} + \dots + D_{mn}}{D_{Mgrupo}} \geq 1 \quad 0-27$$

El factor de diversidad es el valor determinante para el diseño de un sistema de distribución (en términos económicos), y pueden aplicarse también para el cálculo de Alimentadores de subestación,

transformadores de un mismo alimentador, subestaciones de un mismo sistema de distribución, etc.

Es evidente que el valor de diversidad depende directamente de la cantidad de usuarios del sistema, pero, si se graficara el valor del  $F_{Div}$  vs. Cantidad de usuarios se encontraría que a partir de 70 usuarios el valor tiende a ser 3.2 (Figura 0-13). Lo cual permite conocer la demanda máxima diversificada vista desde la subestación a través de la relación del total de la demanda máxima no coincidente (Suma de las  $D_{Max}$  de cada usuario) y el factor de diversidad (3.2 para el caso).

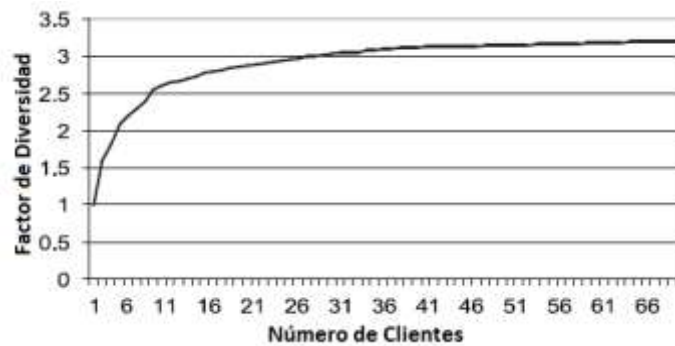


Figura 0-13. Factor de Diversidad Vs. No. de Usuarios [2]

### Factor de Demanda ( $F_D$ )

El factor de demanda o de carga es un término comúnmente usado para describir una carga y está definido como la relación entre la demanda máxima y la carga instalada en un intervalo de tiempo. El  $F_D$  da una indicación de que tanto están siendo usados simultáneamente los elementos que absorben energía del sistema (Fracción de la carga instalada que se está alimentando).

$$F_D = \frac{\text{Carga Máxima}}{\text{Carga Instalada}} = \frac{D_M}{CI} \leq 1 \quad 0-28$$

### Factor de Utilización ( $F_U$ )

El factor de utilización da una indicación de que tanto la capacidad del sistema está siendo usado en el instante en que la carga demandada es máxima (Utilización máxima de la instalación). El factor de utilización es calculado como:

$$F_U = \frac{\text{Carga Máxima}}{\text{Capacidad Instalada}} = \frac{D_M}{PI} \quad 0-29$$

## Factor de Potencia

Es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente, puede ser calculada para todo el sistema o por usuarios individuales.

$$FP = \cos \phi = \frac{P. Activa}{P. Aparente} \quad 0-30$$

EL F.P es un factor importante para el cálculo de las perdidas y caídas de tensión.

## Tipos de Modelo de Carga

Las cargas en un sistema de distribución son especificadas típicamente en forma de potencia compleja, de acuerdo con las características dinámicas de las cargas en un alimentador, la carga específica del sistema es la demanda diversificada. Esta demanda puede ser especificada como kVA y factor de potencia, kW y factor de potencia o kW y kVAr. La tensión de la carga será siempre la tensión de los terminales de baja de la subestación de distribución.

Las cargas en un alimentador de distribución podrían modelarse en conexión Y o  $\Delta$ , de tipo trifásica, bifásica o monofásica con un grado de desbalance, y pueden ser modeladas como:

- Potencia activa y reactiva constante (PQ).
- Corriente constante.
- Impedancia constante.
- Una combinación de las otras.

Los modelos desarrollados se usan en procesos iterativos de programas de flujos de potencia donde las tensiones de las cargas son asumidas en su condición inicial. Uno de los resultados al realizar el análisis de flujos de potencia es reemplazar las tensiones asumidas por las tensiones reales de operación de las cargas. Todos los modelos son inicialmente por una potencia compleja por fase y una tensión asumida de L-N (carga en Y) o L-L (carga en  $\Delta$ ). Las unidades de potencia pueden ser expresadas en VA y V para la tensión, o en VA en p.u. y V en p.u para la tensión.

**Nota:** Los modelos equivalentes de las cargas de este estudio, se expresarán en forma de potencia compleja con P y Q constantes y que corresponden a la demanda promedio de la curva de demanda diversificada de los usuarios.

## ANÁLISIS DE ESTADO ESTABLE Y ESTADO TRANSITORIO DEL SISTEMA DE POTENCIA ELÉCTRICO 33 kV DE CENICAFE

### OBJETIVO GENERAL

Modelar el sistema de potencia eléctrico de la red de 33 kV de Cenicafé, junto con el análisis de estado estable del sistema y el estado transitorio en actividades de maniobra.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Encontrar modelos equivalentes para la S/E Chinchiná, Red de transmisión 33 kV y S/E Cenicafé, incluyendo los elementos que lo conforman.
- Modelado de carga de Cenicafé a nivel de 33 kV.
- Simulación y análisis del Estado Estable de la red actual y en proyecciones de escenarios de demanda.
- Simulación de Estado Transitorio del sistema ante operaciones de maniobra sobre la red y el usuario.
- Diagnosticar la capacidad de respuesta de Cenicafé y el comportamiento del sistema de potencia ante diferentes escenarios de demanda.

### HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

- Para Simulaciones de Estado Estable: NEPLAN
- Para Simulaciones de Estado Transitorio: ATP

### DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA [6]

El sistema de potencia eléctrico de Cenicafé se encuentra alimentado a nivel de 33 kV desde la Subestación Chinchiná del operador de red CHEC, la red de distribución parte desde S/E Chinchiná y pasa a un costado del embalse Cameduadua hasta el seccionador principal de la red de Cenicafé, que se encuentra ubicado dentro de los predios de la Fábrica BuenCafé Liofilizado.

Desde el seccionador principal de 33 kV la línea trifásica se apoya en 22 postes hasta llegar a la Subestación Principal de transformación 33 kV/13.2 kV con una distancia de recorrido de alrededor de 2.3 km atravesando zona rural y urbana, de alta problemática de orden público y alto con altas necesidades de control de vegetación.

En la subestación de Cenicafé, se encuentra un transformador de 500 kVA de capacidad con relación de transformación 33 kV/ 13.2 kV, y un sistema de transferencia automática hacia la carga, para energizar ya sea por Red del operador o por la planta eléctrica (Cummins 500 kW).



Los transformadores de distribución de 13.2 KV/ 0.220 kV son energizados a través de dos derivaciones de red de distribución a nivel de 13.2 kV, hasta llegar a los transformadores de los Edificios 1, 2 y 3 del sector de PlanAlto y los dos transformadores de la granja.

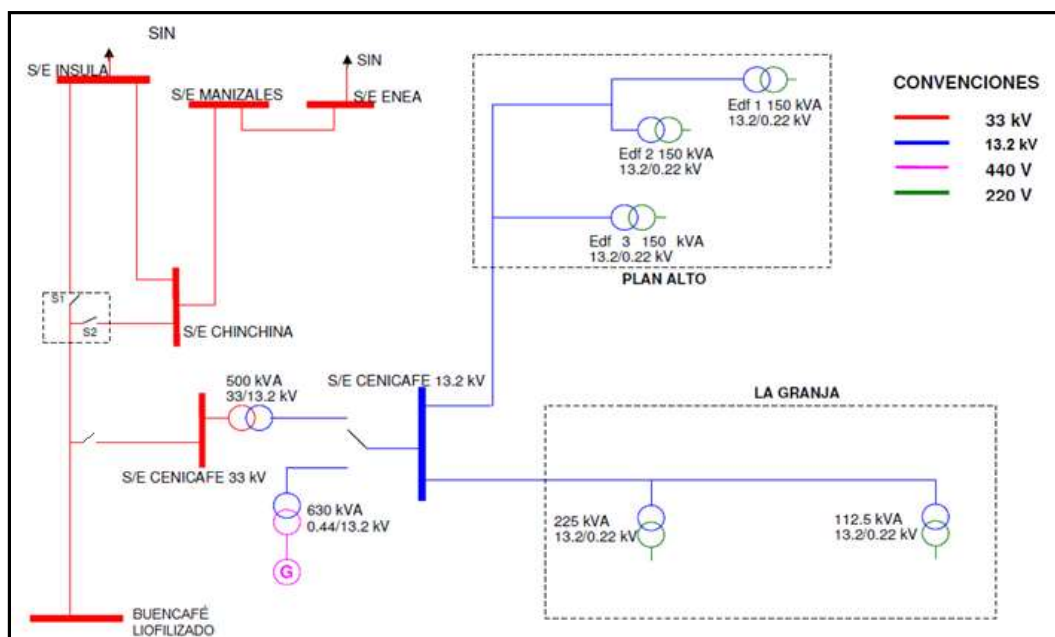


Figura 0-1. Diagrama Unifilar Sistema Eléctrico de CENICAFÉ

- **Seccionador Principal Línea 33 kV**

Ubicación: Fábrica Buencafé Liofilizado

Tipo: Cuchilla Tripolar de accionamiento Manual.

Fusibles tipo HH de 36 kV/24 A

- **Línea de distribución 33 kV**

Ubicación: Atraviesa zona urbana y rural de Chinchiná, hasta la reserva forestal plan Alto donde se encuentra ubicado Cenicafé.

Tipo: Conductores de aluminio cableados con núcleo de acero galvanizado (A.C.S.R/GA) con sección de aluminio de 2/0 MCM. Designación de fabricante Quail (2/0 ACSR).

Apoyos: Los apoyos de la línea de distribución lo conforman postes de concreto, estructuras metálicas y crucetería de diferentes disposiciones dependiendo del terreno, vuelo y necesidad.



*Figura 0-2. Seccionador Principal Línea 33 kV*



*Figura 0-3. Red y Apoyos Línea de 33 kV*

- **Subestación Eléctrica Cenicafé**

Transformación: 33 kV a 13.2 kV (Reductora)

Ubicación: Reserva forestal PlanAlto

Potencia Nominal: 500 kVA.

Descripción: La subestación reductora se encuentra energizada por la línea de 33 kV de que parte desde subestación Chinchiná. Cuenta con salidas en dos circuitos de 13.2 kV que energizan los transformadores de PlanAlto y La Granja, junto con un sistema de transferencia automático para energizar por Planta Eléctrica (cap. 500 kW) ante contingencia de la red de 33 kV o el transformador.



*Figura 0-4. Subestación 33/13.2 kV Cenicafé*

## MODELO EQUIVALENTE SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA 33 kV

Para realizar un estudio y análisis de estado estable y transitorio del sistema de potencia eléctrico de Cenicafé, se hace necesario modelar los elementos del mismo. A continuación se discriminan sus modelos equivalentes y el proceso por el cual se realizó.

### Red Equivalente Subestación Chinchiná

El modelo de la red equivalente de red corresponde a cómo se ve el sistema del operador de red CHEC desde el punto de conexión del sistema de Cenicafé. Para este caso, el equivalente se ve desde la Subestación Chinchiná 33 kV.

Los datos de fallas Monofásicas y Trifásicas para encontrar el modelo fueron solicitados al operador de red por intermedio del Coordinador de Mantenimiento de Cenicafé, donde se encontraron los siguientes resultados.

**Nivel de 33 kV**

- Potencia de Cortocircuito Monofásica: 108.54 MVA
- Potencia de Cortocircuito Trifásica: 462.355 MVA
- Corriente de Falla Monofásica: 5.697 kA
- Corriente de Falla Trifásica: 8.089 kA

**Datos Simulación  
NEPLAN**

Para Los datos de simulación en ATP se modela la red equivalente como un circuito equivalente de Thevenin con un generador y una impedancia equivalente con los siguientes resultados.

**Nota:** Para el modelo equivalente se asume una tensión en barra de 1.02 pu

$V_{\text{nodo}} = 1.02 \text{ pu} \Rightarrow 33.66 \text{ kV}$  (Tensión en S/E Chinchiná)

**Ang V** =  $-2.87^\circ$

$I_{\text{sc}3\Phi} = 8.089 \text{ kA}$

**Ang I** =  $-84.34^\circ$

**Datos Base**

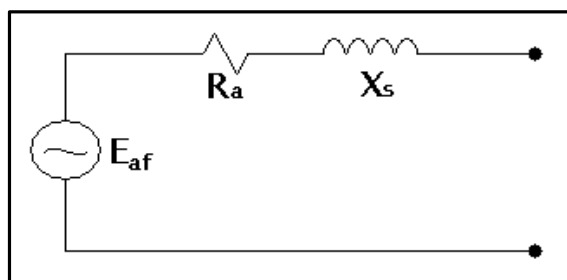


Figura 0-5. Equivalente Thevenin S/E Chinchiná

$$Z_{eq} = \frac{33.66 \angle -2.87^\circ \text{ kV}}{8.089 \angle -84.34^\circ \text{ kA}} = 4.1612 \angle 81.47^\circ \Omega$$

$$R = Z_{eq} \cos \theta = 0.6172 \Omega$$

$$L = \frac{Z_{eq} \sin \theta}{2\pi F} = 10.9158 \text{ mH}$$

**Datos Simulación  
ATP**

### Línea de Distribución 33 kV

De acuerdo con las características de la línea de distribución de Cenicafé, y consideran la clasificación de estas la sección 0, se puede considerar como una línea corta porque transmite energía eléctrica a tensiones menores a 44 kV, y su longitud es menores a 50 km, donde el efecto capacitivo de la línea es despreciable.

El circuito equivalente para líneas calificadas como cortas se muestra en la Figura 0-6.

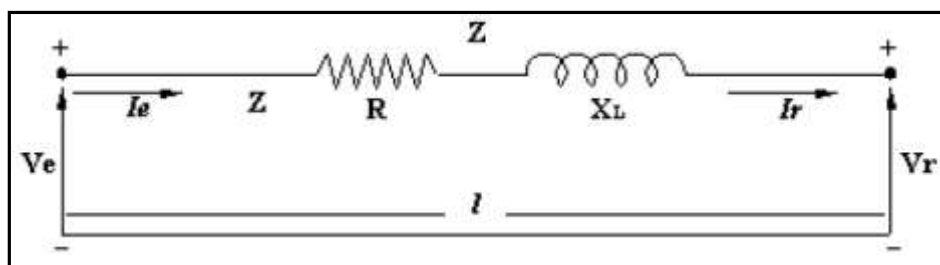


Figura 0-6. Equivalente Línea Corta [1]

Sabiendo que los parámetros para el modelo de la línea equivalente a tener en cuenta son la resistencia y reactancia propia del conductor, en la Tabla 0-1 [4] se discriminan las características generales del conductor.

Tabla 0-1. Características Generales Conductor ACSR 2/0 AWG [4]

Calibre (AWG o MCM)	Designación	Núcleo de Alambres		Diámetro Nominal		Peso Aproximado			Carga de Rupura kN
		Aluminio	Acero	Núcleo (mm)	Cable (mm)	Aluminio kg/km	Acero kg/km	Cable kg/km	
2/0	Quail	6	1	3,8	11,4	185	87	272	23,6

La red de distribución cuenta con 20 apoyos desde la partida en Liofilizado hasta la S/E de Cenicafé, con los siguientes tipos de estructuras [6]:

**Tipo L:** Estructura constituida por tres postes de concreto, para circuito sencillo, aislamiento con aislador tipo disco, crucetas metálicas, cable de guarda en A.C.S.R No. 2 reforzado. Solo se usa en el arranque en la Fábrica Buencafé Liofilizado.

**Tipo D:** Estructura constituida por dos postes de concreto, para circuito sencillo, aislamiento con aislador tipo disco, crucetas metálicas doble, con un cable de guarda.

**Tipo A:** Estructura constituida por un poste de concreto, para circuito sencillo, aislamiento con aislador tipo Pin, crucetas metálicas sencillas y con un cable de guarda.

**Tipo B:** Estructura constituida por un poste de concreto, para circuito sencillo, aislamiento con aislador tipo pin, crucetas metálicas de 3 m y con un cable de guarda.

**Tipo C:** Estructura constituida por un poste de concreto para circuito sencillo, aislamiento con estructura tipo pin, cruceta metálica sencilla de 4 m y con un cable de guarda en A.C.S.R. No. 2 reforzado.

**Tipo DP:** Estructura constituida por un poste de concreto para circuito sencillo aislamiento con estructura doble pin, doble cruceta metálica y con un cable de guarda en A.C.S.R. No. 2 reforzado.

La disposición de los conductores se hace a través de cables monopolares aéreos, como un sistema trifásico alineado con separaciones variables dependiendo de la estructura como se presenta en la Figura 0-7

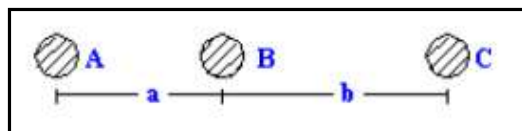


Figura 0-7. Sistema Trifásico Alineado

Tabla 0-2. Distancias entre Conductores

TIPO	Distancias	
	a (mm)	b (mm)
A	1600	1300
B	1450	1450
C	1950	1950
D	1450	1450
DP	1450	1450

### Resistencia Equivalente Secuencias 1 y 2

La resistencia a la corriente directa y alterna de conductores de aluminio 2/0 tipo ACSR a 60 Hz, se presenta en la Tabla 0-3 [4].

Tabla 0-3. Resistencia Directa y Alterna por Conductores de ACSR 2/0 [4]

Calibre (MCM)	Designación	Resistencia C.D	Resistencia C.A		
		$\Omega/\text{km}$ 20 °C	25 °C	50 °C	75 °C
2/0	Quail	0,416	0,426	0,530	0,580

Teniendo en cuenta que la distancia total de la línea de distribución es de 2296 m y asumiendo una temperatura del conductor de 50 °C, se tiene:

$$R^{1,2} = 0.530 \frac{\Omega}{km} * 2.296 km = 1.217 \Omega$$

Dato de Simulación para Neplan y ATP

### Reactancia Inductiva Secuencias 1 y 2

De acuerdo con la Sección 0 y la ecuación 0-5, se tiene que:

$$X_L = 0.173 \log \frac{DMG}{RMG} \frac{\Omega}{km}$$

En la Tabla 0-4 se muestra el valor numérico de RMG para el conductor usado en la red de distribución del circuito de 33 kV de Cenicafé [4].

Tabla 0-4. RMG Conductor ACSR Quail [4]

Calibre AWG o MCM	ACSR		RMG (mm)
	No. de Hilos		
	Acero	Al	
2/0	1	6	1.55448

Entonces, conociendo el valor del RMG del conductor de trabajo y calculado la DMG de acuerdo a la distribución de los conductores en los diferentes tipos de estructuras, se tiene los valores de  $X_L$  en la Tabla 0-5.

Tabla 0-5. DMG y Reactancia Inductiva por tipo de Estructura

Tipo	a (mm)	b(mm)	DMG (mm)	$X_L$ (Ω/km)
A	1600	1300	1820,345	0,5327035
B	1450	1450	1826,886	0,5329739
C	1950	1950	2456,846	0,5553104
D	1450	1450	1826,886	0,5329739
DP	1450	1450	1826,886	0,5329739

La reactancia inductiva equivalente en secuencias 1 y 2 de la línea de distribución, corresponde entonces a la sumatoria de las reactancias inductivas de las secciones entre los apoyos (desde el 1 al 20).



$$X_{Leq}^{1,2} = \sum_{i=1}^{19} X_L * \log(i \rightarrow i + 1) \quad 0-1$$

Resultando entonces que:

$$X_{Leq}^{1,2} = 1,242 \, \Omega$$

Dato de simulación para NEPLAN

En unidades de Inductancia:

$$L = \frac{X_{Leq}}{2\pi f} \times 1000 = 3.2958 \, mH$$

Dato de simulación para ATP

#### Impedancia Equivalente de Secuencias 0

Sin profundizar en la teoría del cálculo de la impedancia de secuencia 0 en líneas de distribución, usaremos las teorías de Carson y Polarzek para calcular los parámetros de resistencia y reactancia inductiva con la siguiente ecuación.

$$Z_0 = (R_{ca} + 3 \times 10^{-3} * f) + j\omega * \left( 3 \times 10^{-3} * 0,46 * \log \frac{700 * \sqrt{\rho/f}}{\sqrt[3]{\xi * r * D_m}} \right) \quad 0-2$$

Donde:

$R_{ca}$  : Resistencia del conductor por fase ( $\Omega/km$ )

$\rho$  : Resistividad del terreno ( $\Omega.km$ )

$f$  : Frecuencia de la red (Hz)

$r$  : Radio del conductor por fase (m)

$D_m$  : Distancia media geométrica (m)

$\xi$  : Coeficiente de haz; 0,78 (un conductor por fase); 0,94 (Cuatro conductores por fase).

De esta forma, con lo datos de la Tabla 0-3 y sabiendo que la frecuencia de la red es de 60 Hz, se tiene que:

$$R_0 = 0.530 + 3 \times 10^{-3} * (60)$$

$$R_0 = 0.7078 \, \Omega/km$$



Conociendo la longitud total de la línea de distribución se tiene que:

$$R^0 = 0.7078 \frac{\Omega}{km} * 2.296 km = 1,625 \Omega$$

Datos de Simulación para Neplan y ATP

Por otro lado, la reactancia inductiva con:

$\rho = 40 \Omega.m$  (Resistividad típica).

$\xi = 0.78$

$r = 0.00155448 m$  (De la Tabla 0-4)

Y teniendo en cuenta las Distancias medias Geométricas de las diferentes configuraciones de la red se tiene la reactancia inductiva para cada una de ellas es:

Tabla 0-6. DMG y Reactancia Secuencia 0 por estructura

Tipo	a (mm)	b(mm)	DMG (mm)	$X^0 (\Omega/km)$
A	1600	1300	1820,345	0,893623
B	1450	1450	1826,886	0,898369
C	1950	1950	2456,846	0,848458
D	1450	1450	1826,886	0,898369
DP	1450	1450	1826,886	0,898369

La reactancia inductiva equivalente en secuencia 0 de la línea de distribución, corresponde entonces a la sumatoria de las reactancias inductivas de las secciones entre los apoyos (desde el 1 al 20). Usando la misma ecuación 0-1 se tiene entonces que:

$$X_{Leq}^0 = 1,990 \Omega$$

Dato de simulación para NEPLAN

En unidades de Inductancia:

$$L = \frac{X_{Leq}}{2\pi f} \times 1000 = 5.2793 mH$$

Dato de simulación para ATP

### Transformador 33 kV / 13.2 kV

De acuerdo con las placas características del transformador de potencia y las pruebas de cortocircuito y circuito abierto, se tienen los siguientes datos del transformador [7].

Relación de Transformación	S [MVA]	V <sub>H</sub> [kv]	V <sub>L</sub> [kv]	Z <sub>cc</sub> <sup>+0</sup> (%)	Grupo Vectorial	V <sub>tap</sub> (%)	Nom <sub>tap</sub>	Min <sub>tap</sub>	Max <sub>tap</sub>	Pos <sub>tap</sub>
33 kV/13.8 kV	0,5	33	13,8	5	Dy5	2,5	0	-2	2	0

Datos de simulación para NEPLAN y ATP

Se asume en el transformador una relación X/R=10%

### Carga Equivalente

Para el alcance del modelo del sistema de distribución de 33 kV, teniendo en cuenta que no se conocen las cargas a nivel de 13.2 kV que corresponden a la salidas de los circuitos que alimentan los sectores de “La Granja” y “Plan Alto” en Cenicafé, se modela la carga con la demanda de energía Activa y Reactiva reportada por la Factura del Operador de Red en el mes de Septiembre de 2014 a nivel de 33 kV (Nivel de facturación para FNC-Cenicafé), y se realiza la respectiva relación de transformación para el devanado de 13.2 kV del Transformador principal de Subestación.

**Nota:** Con los datos resultantes del Estudio de Calidad de la Energía que se realizará como un capítulo aparte, se modelará la red de 13.2 kV junto con las cargas anteriormente nombradas para completar el modelo del sistema de distribución de CENICAFÉ.

En la facturación de CHEC, el valor reportado de energía en cada hora (kWh y kVARh), corresponden a la suma de todos los consumos de todos los días del mes a esa hora, p.e. en la hora 1, los kWh son 3726 y corresponden a la suma de la energía consumida en los 30 días del mes para esa hora.

Para el modelo de estado estable del sistema de distribución, se pretende evaluar el comportamiento del sistema en regulaciones de tensión, factor de potencia, pérdidas, etc en diferentes escenarios de demanda, con proyecciones de variación de la carga hasta el 2020.

En la Tabla 0-7 se presenta la curva de demanda de Cenicafé a nivel de 33 kV de acuerdo con la facturación. Los datos en color rojo son calculados como se muestra en las siguientes formulaciones.

Tabla 0-7 Curva de demanda Mes de Septiembre 2014

Hora	Energía		Potencia		
	kWh	kVArh	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
1	3276	2005	109,2	66,8	128,0
2	3280	2022	109,3	67,4	128,4
3	3267	2025	108,9	67,5	128,1
4	3267	2045	108,9	68,2	128,5
5	3265	2021	108,8	67,4	128,0
6	3256	2008	108,5	66,9	127,5
7	3188	1949	106,3	65,0	124,6
8	2992	1988	99,7	66,3	119,7
9	3340	1947	111,3	64,9	128,9
10	4263	2125	142,1	70,8	158,8
11	4684	2262	156,1	75,4	173,4
12	4748	2294	158,3	76,5	175,8
13	4786	2312	159,5	77,1	177,2
14	4372	2239	145,7	74,6	163,7
15	4556	2285	151,9	76,2	169,9
16	4768	2358	158,9	78,6	177,3
17	4691	2377	156,4	79,2	175,3
18	4601	2412	153,4	80,4	173,2
19	3977	2290	132,6	76,3	153,0
20	3564	2075	118,8	69,2	137,5
21	3567	2039	118,9	68,0	137,0
22	3342	1959	111,4	65,3	129,1
23	3398	1989	113,3	66,3	131,2
24	3315	1985	110,5	66,2	128,8

$$P = \frac{E_{activa}}{30} (kW) \therefore 30 = \text{dias del mes}$$

0-3

$$Q = \frac{E_{reactiva}}{30} (kVAR) \therefore 30 = \text{dias del mes}$$

0-4

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ (kVA)}$$

0-5

$$FP = \cos\left(\frac{P}{S}\right)$$

0-6

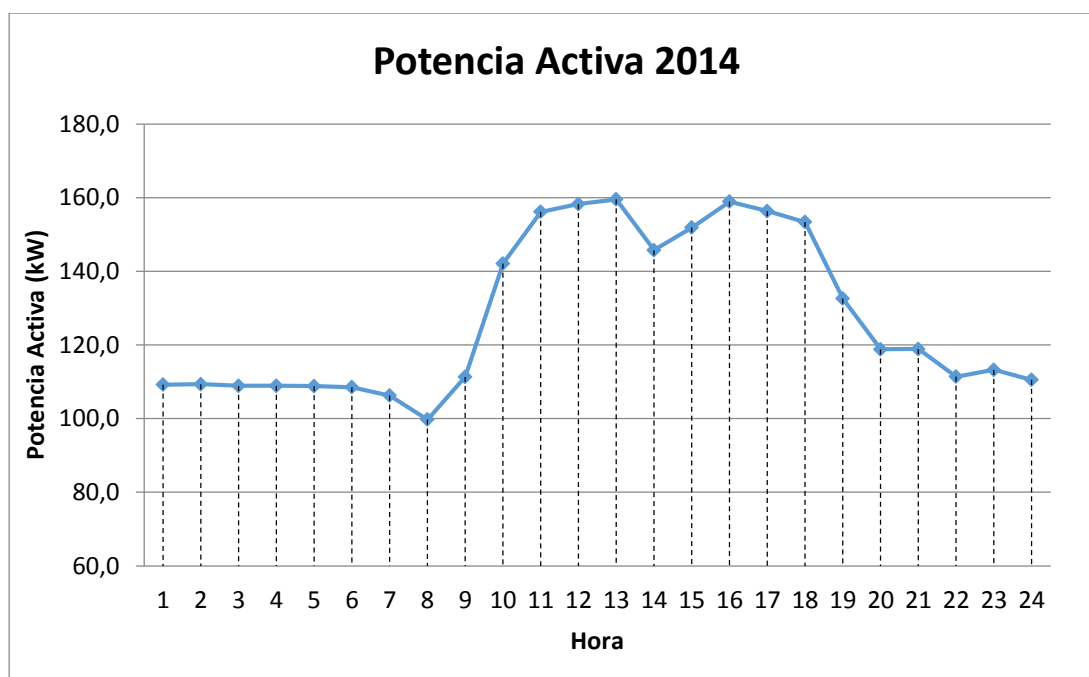


Figura 0-8. Curva Típica de Demanda Cenicafé

En la Tabla 0-8 se resaltan los valores máximos, mínimos y promedios de las magnitudes de potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia, que son los valores con los cuales se modelara la carga de Cenicafé en un escenario base de demanda máxima (Carga máxima demandada a 2014).

Tabla 0-8. P, Q, S y FP máx, mín y promedio Sep 2014

	Potencia TOTAL			F.P
	kW	kVAr	kVA	
MAX	159,5	80,4	177,3	0,62
MIN	99,7	64,9	119,7	0,67
AVR	127,4	70,8	146,0	0,64

} CASO BASE

En la Tabla 0-9 se presenta la variación en porcentaje de los próximos años, para los escenarios de demanda Bajo, medio y alto de la demanda de Cenicafé.

Estos datos fueron suministrados por la Unidad de Planeación Financiera y Presupuesto, estimando el incremento de ingresos provenientes de convenios y regalías, lo cual implicaría a su vez el aumento de contratación de personal y la renovación y adquisición de equipos e infraestructura.

Tabla 0-9. Porcentaje de Variación de Demanda proyectada

	B	M	A
2015	5%	10%	15%
2016	3%	5%	7%
2017	-3%	-2%	-1%
2018	-3%	-2%	-1%
2019	-3%	-1%	-1%
2020	-2%	-1%	-1%

En la Figura 0-9 se puede visualizar gráficamente la proyección de la demanda para los próximos años. Donde la línea punteada es el escenario Medio, la franja azul el escenario alto y la Naranja el escenario bajo.

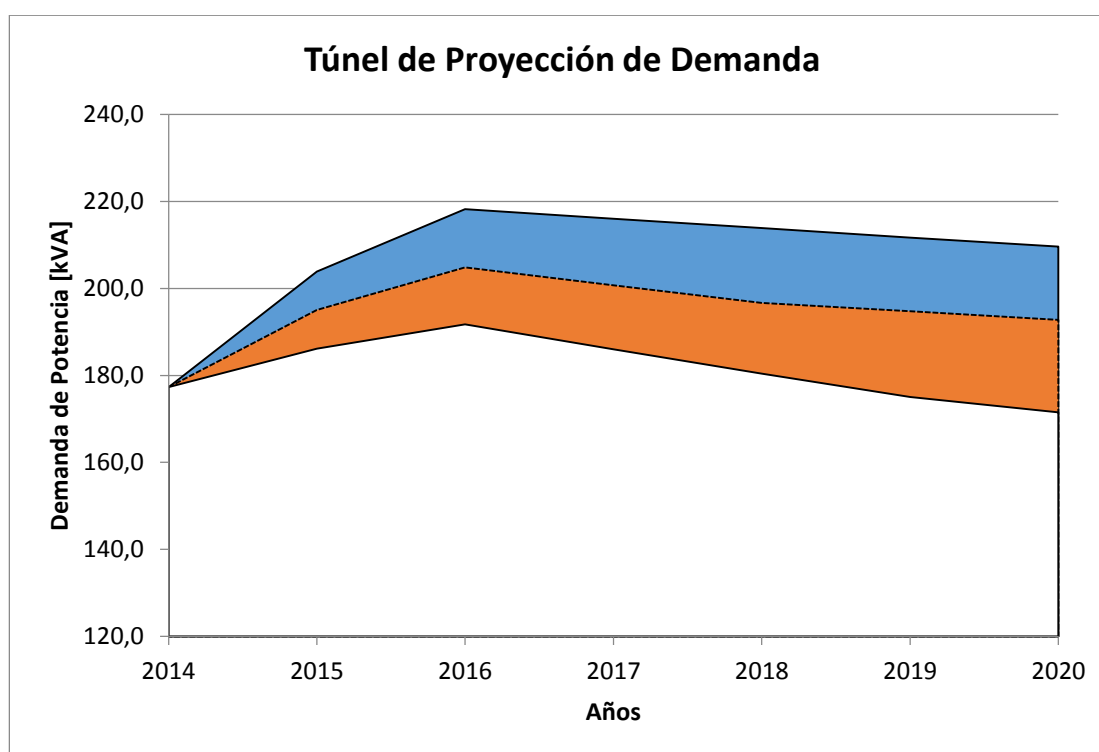


Figura 0-9. Túnel de Proyección de Demanda

Teniendo entonces los siguientes escenarios de demanda para el año correspondiente.

Tabla 0-10. Escenarios de demanda próximos años

	B	M	A
2014	177,3	177,3	177,3
2015	186,2	195,0	203,9
2016	191,8	204,8	218,2
2017	186,0	200,7	216,0
2018	180,4	196,7	213,8
2019	175,0	194,7	211,7
2020	171,5	192,8	209,6
En kVA			

**Nota:** Para efectos de análisis de estado estable, se realizarán las simulaciones analizando los escenarios para el año 2017.

Teniendo en cuenta que las simulaciones de estado transitorio se llevan a cabo en ATP, y que éste software requiere unidades de resistencia e inductancia para simular la carga equivalente, entonces:

Con los valores de caso base

$$\begin{aligned}
 P &= 159,5 \text{ kW} \\
 Q &= 80,3 \text{ kVAr} \\
 S &= 177,3 \text{ kVA} \\
 F.P. &= 0,6
 \end{aligned}$$

Se calcula  $R$  y  $L$  equivalentes para cada línea, asumiendo que la carga de Cenicafé se encuentra balanceada en las fases ABC:

$$\begin{aligned}
 P_{1\phi} &= \frac{P_{3\phi}}{3} = \frac{159,5}{3} = 53,2 \text{ kW} \\
 Q_{1\phi} &= \frac{Q_{3\phi}}{3} = \frac{80,3}{3} = 26,8 \text{ kVAr} \\
 I_{Lsec} &= \frac{S}{V_{Lsec}} = \frac{P_{1\phi}}{F.P. * V_{Lsec}} = \frac{P_{1\phi}}{F.P. * \sqrt{3} V_{Fsec}} = \frac{159,5}{\sqrt{3} * 13,8 * 0,6}
 \end{aligned}$$

$$I_{Lsec} = 0,01073 \text{ kA}$$

Donde  $I_{Lsec}$  corresponde a la corriente de línea de los devanados secundarios del transformador (carga referida a nivel de 13,2 kV).

Como:

$$P = I^2 R$$

$$Q = I^2 X_L \rightarrow Q = I^2 * 2\pi f L$$

Entonces:

$$R_{eq1\phi} = \frac{P_{1\phi}}{I_{Lsec}^2} = 461,54 \, \Omega$$

$$L_{eq1\phi} = \frac{Q_{1\phi}}{I_{Lsec}^2 * 2\pi * 60} = 616,99 \, mH$$

**Datos de Simulación para ATP**

## SIMULACIÓN Y RESULTADOS

### Simulación de Estado Estable

Ajustados a los objetivos y desarrollo de los modelos, se presenta en primera instancia los resultados de simulación del Estado estable de la red de Distribución de 33 kV. Donde en la Figura 0-10 se muestra el circuito equivalente en el software NEPLAN [8].

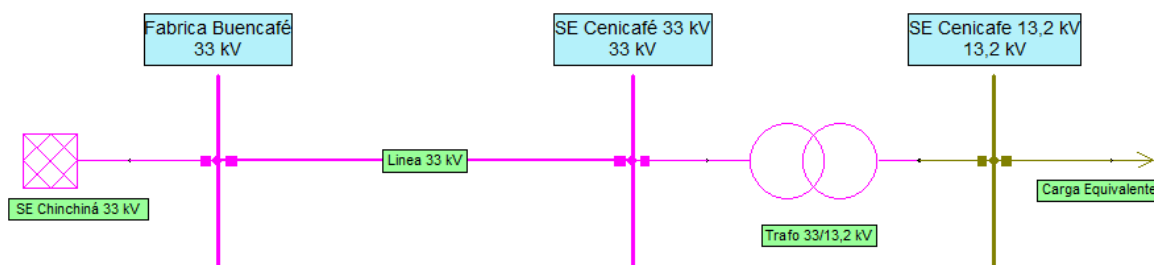


Figura 0-10. Circuito Equivalente red 33 kV NEPLAN

De acuerdo con los cálculos realizados en los numerales anteriores de éste capítulo, se resumen los datos para el modelado de los elementos de la red (Caso Base) en la Tabla 0-11.

Tabla 0-11. Resumen Elementos Simulación Neplan Red 33 kV (Caso base)

<p><b>S/E Chinchiná 33 kV</b></p> <p>Potencia de Cortocircuito Trifásica = 642,355 MVA  Corriente de falla trifásica = 8,089 kA  Tensión Nominal: 1,02 p.u</p>	<p><b>Línea Distribución 33 kV</b></p> <p>Longitud = 2,296 km  <math>R(1) = 0,53 \Omega/\text{km}</math>  <math>R(0) = 0,7079 \Omega/\text{km}</math>  <math>X(1) = 0,5411 \Omega/\text{km}</math>  <math>X(0) = 0,8668 \Omega/\text{km}</math></p>
<p><b>Transformador 33/13.2 kV</b></p> <p>Relación de Transformación = 33 / 13.2 kV  Potencia = 0,5 MVA  Grupo Vectorial = Dy5  <math>Z^{0}_{CC} = 5\%</math>  <math>V_{\text{tap}} = 2.5\%</math> ; <math>\text{Min}_{\text{tap}} = -2</math> ; <math>\text{Max}_{\text{tap}} = 2</math> ; <math>\text{Postap} = 0</math></p>	<p><b>Carga Equivalente</b></p> <p><math>S = 0,177 \text{ MVA}</math>  <math>F.P = 0,6</math></p>

Caso Base: Para el caso Base se obtienen los siguientes resultados.

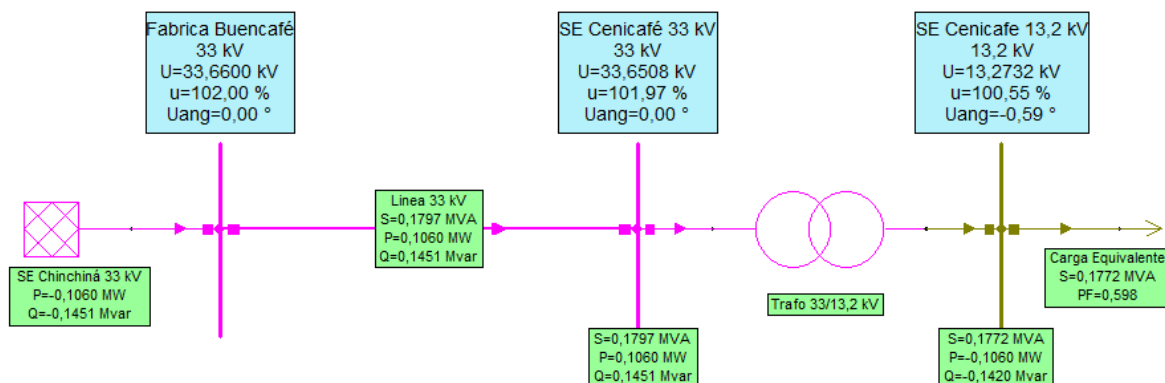


Figura 0-11. Simulación E.E red 33 kV Caso Base

Referidos a la Tabla 0-10, se realiza una evaluación de comportamiento de la red en estado estable, ante las variaciones de carga proyectadas para el 2017 en escenarios de demanda baja, media y alta;



Escenario de Demanda Bajo en 2017: Teniendo en cuenta que para el escenario de demanda bajo en el 2017 se asume un crecimiento a **186 kVA**, se tienen los siguientes resultados:

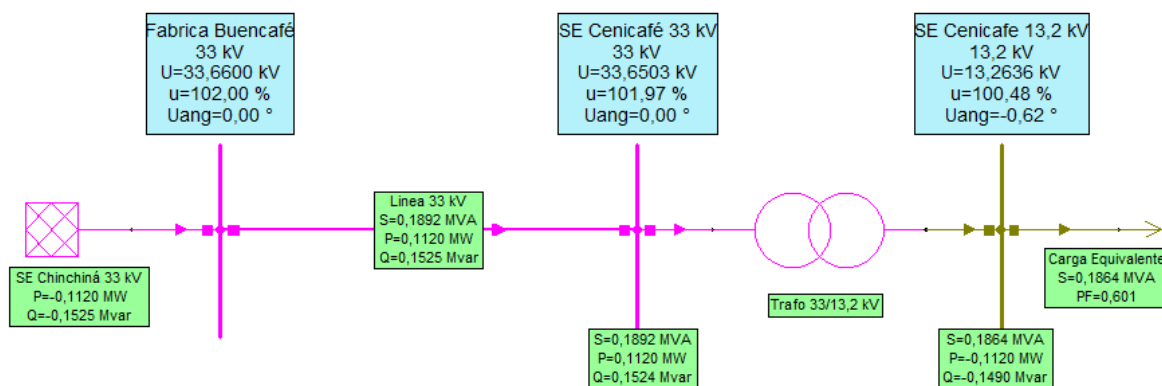


Figura 0-12. Simulación E.E red 33 kV escenario Bajo en 2017

Escenario de Demanda Medio en 2017: Para el escenario de demanda medio en el 2017 se asume un crecimiento a **200,7 kVA**, se tienen los siguientes resultados:

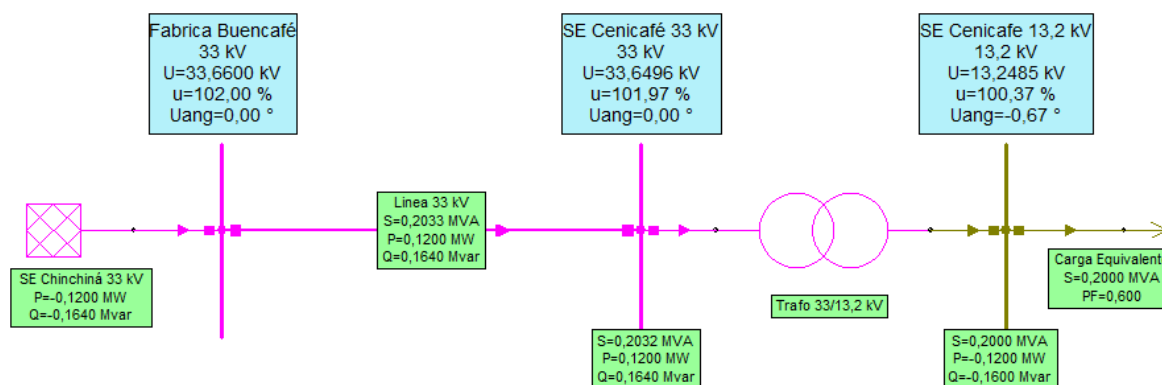


Figura 0-13. Simulación E.E red 33 kV escenario Medio en 2017

Escenario de Demanda Alto en 2017: Para el escenario de demanda Alto en el 2017 se asume un crecimiento a **216 kVA**, se tienen los siguientes resultados:

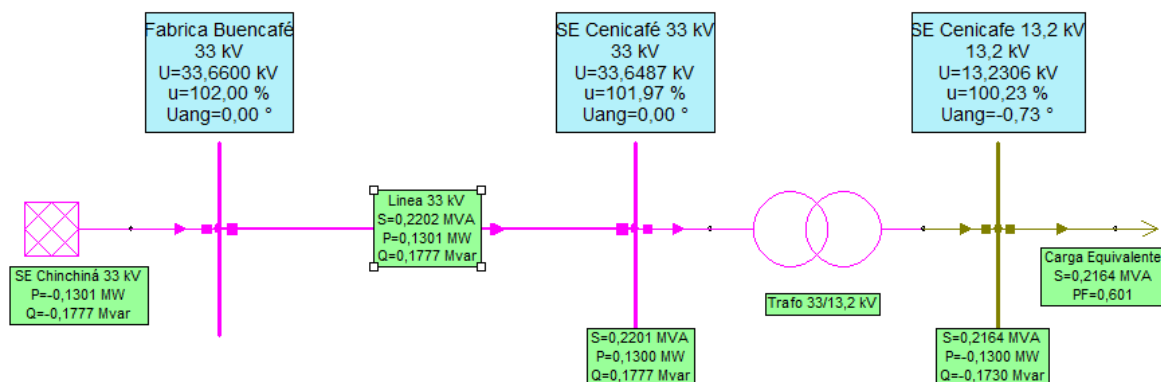


Figura 0-14. Simulación E.E red 33 kV escenario Alto en 2017

### Simulación de Estado Transitorio

Para las simulaciones de estado transitorio se hace uso de la herramienta de simulación ATP, donde los parámetros de simulación deben ser asignados de forma diferente de Neplan. En la siguiente tabla se presenta el resumen de los datos ingresados para los elementos en ATP. Apoyado con las referencias [9] [10].

Tabla 0-12 Resumen Elementos Simulación ATP Red 33 kV

<p><b>S/E Chinchiná 33 kV (Circuito Equ. Thévenin)</b></p> <p>Amplitud Fuente = 57157 V  <math>f = 60 \text{ Hz}</math>  Angulo = <math>0^\circ</math>  <math>R_{fase} = 0,617 \Omega</math> ; <math>L_{fase} = 10,91 \text{ mH}</math></p>	<p><b>Línea Distribución 33 kV</b></p> <p>Longitud = 2296 m  <math>R(1) = 0,00053 \Omega/\text{m}</math>  <math>R(0) = 0,00070 \Omega/\text{km}</math>  <math>X(1) = 0,00054 \Omega/\text{m}</math>  <math>X(0) = 0,00086 \Omega/\text{mm}</math></p>
<p><b>Transformador 33/13.2 kV</b></p> <p>Relación de Transformación = 33 / 13.2 kV  Potencia = 0,5 MVA  Grupo Vectorial = Dy5  <math>Z^{+0}_{cc} = 5\%</math>  <math>V_{tap} = 2.5\%</math> ; <math>Min_{tap} = -2</math> ; <math>Max_{tap} = 2</math> ; <math>Pos_{tap} = 0</math></p>	<p><b>Carga Equivalente</b></p> <p><math>R_{fase} = 461,5 \Omega</math>  <math>L_{fase} = 617 \text{ mH}</math></p>

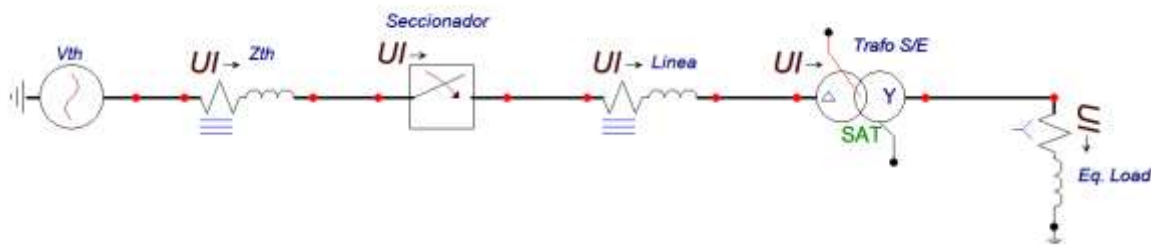


Figura 0-15. Circuito Equivalente Red 33 kV ATP

En la Figura 0-15 se tiene el circuito equivalente del modelo de los elementos del sistema eléctrico de potencia de Cenicafé a nivel de 33 kV. Con este análisis se pretende determinar cómo se manifiesta el TRV (Transient Recovery Voltage) sobre los terminales del seccionador al realizar la apertura de este con carga.

El “Transient Recovery Voltage” es la diferencia entre las tensiones del lado emisor y la carga, que se manifiesta entre los terminales del interruptor, después de la interrupción de corriente. El objetivo de determinar El TRV es determinar el esfuerzo al cual el interruptor está sometido en el momento de la ejecución de la maniobra [11].

Con el propósito representar el escenario más crítico de TRV, se programa la apertura del seccionador en la cresta de la onda de la fase C. Donde se obtienen los resultados de la Figura 0-16

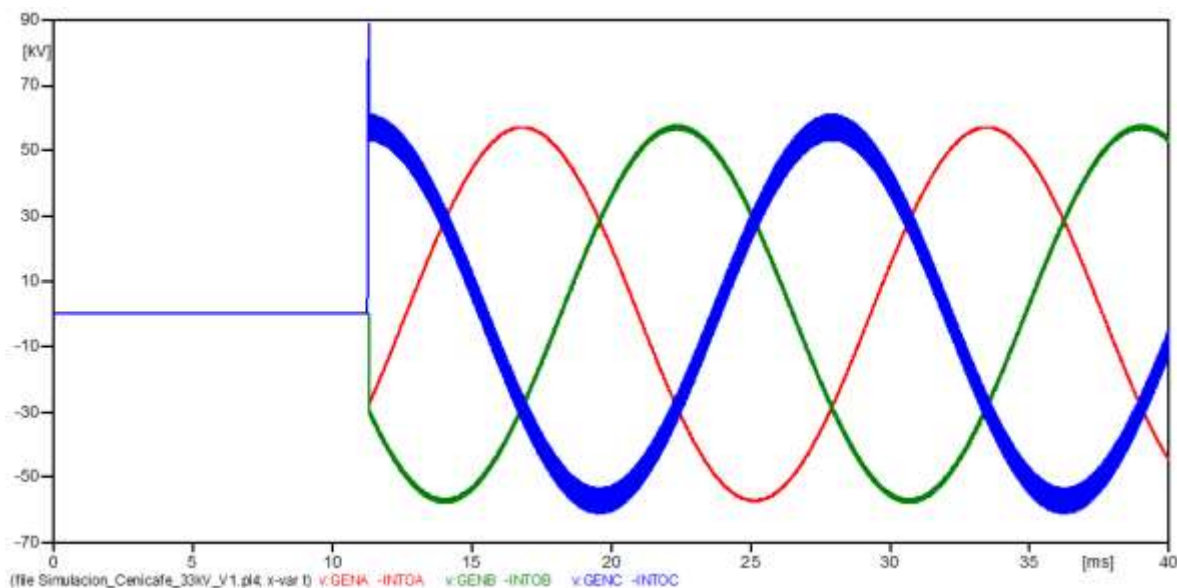


Figura 0-16. TRV en Terminales de Seccionador

Haciendo un zoom sobre el intervalo de tiempo donde se realiza la apertura del interruptor (Figura 0-16), se puede registrar que la magnitud de tensión transitoria sobre los terminales del interruptor alcanzan en su valor máximo cercano a 88 kV que corresponden a un 54 % más de la tensión pico

que se tiene sobre esa sección del sistema de distribución (57.157 kV  $\rightarrow$   $33\sqrt{3}$  kV), lo que implicaría una ruptura del Interruptor si su capacidad en tensión no estuviese ajustada a este valor máximo.

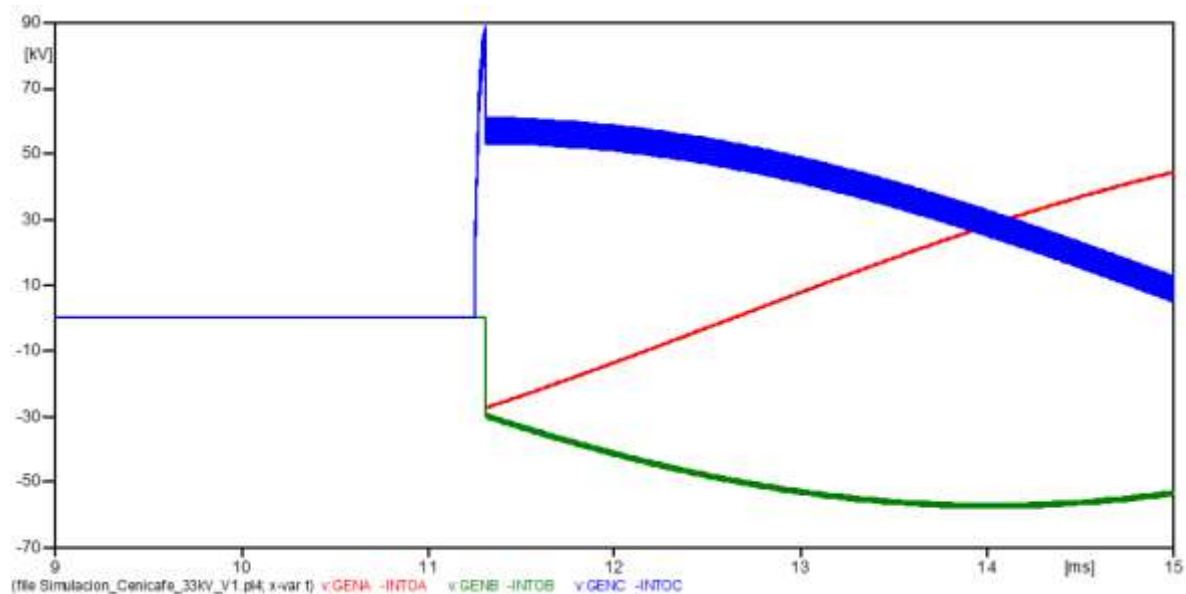


Figura 0-17. Magnitud TRV Fase C

## CARACTERIZACIÓN DE CARGAS A NIVEL DE 208 V.

### OBJETIVO GENERAL

Analizar el estado general del sistema eléctrico de distribución de Cenicafé - PlanAlto mediante el monitoreo de variables eléctricas enfocándolo en el entorno de calidad de la Energía.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Medición de las variables de tensión, corriente y frecuencia de las celdas de carga de los edificios 1, 2 y 3.
- Caracterización de la carga y demanda de los edificios 1, 2 y 3 (Circuito equivalente).
- Medición de armónicos en las celdas de carga.
- Medición de cargas específicas que pueden representar un alto consumo sobre las celdas de carga de los edificios.
- Analizar alternativas para mejorar el desempeño del sistema de distribución de Cenicafé ante fenómenos de distorsión de onda (en tensión y corriente), desbalanceo y bajo factor de potencia.

### HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS

Para el análisis de las variables eléctricas se cuenta con un equipo analizador de red trifásico Fluke 1735 que cuenta con las siguientes características básicas [12]:

- Registro de energía eléctrica y sus parámetros correspondientes (hasta 45 días)
- Supervisión de la demanda máxima de potencia a lo largo de períodos medios definidos por el usuario.
- Medida de la distribución de armónicos producidos por cargas electrónicas.
- Captura de fluctuaciones de tensión debido a la conexión y desconexión de grandes cargas.
- Medida trifásica y Neutro.
- Software **PowerLog®** de Fluke para la visualización de gráficos y generación de informes.

### JUSTIFICACIÓN

Cenicafé cuenta con una gran estructura de Laboratorios y equipos de alta tecnología, como servidores, espectrofotómetros, HPLC, UPLC, NIRS y demás equipos de medición que necesitan altos requisitos eléctricos en cuanto a confiabilidad, disponibilidad de la red, calidad de la potencia, compatibilidad electromagnética, sistemas de puesta a tierra, supresiones de sobretensión, transitorios y demás variables que afectan el desempeño, rendimiento y vida útil de los equipos.

Por lo anterior, se hace necesario realizar un estudio sectorizado de estas variables para focalizar problemas, actividades predictivas, preventivas y de mejora que permitan tener un conocimiento más completo sobre el desempeño del sistema de distribución de Cenicafé ante éstos parámetros eléctricos.

## METODOLOGÍA

Las principales etapas para el estudio de Caracterización de cargas de Cenicafé – PlanAlto, enfocado a la medición de variables eléctricas que permitan determinar el estado de calidad de la energía son:

### **Etapas 1: Medición de Tensión, Corriente y Frecuencia de Red.**

Como primera etapa del estudio, se planea ejecutar actividades de medición trifásica, sobre los tableros principales (celdas de carga) de los edificios 1, 2 y 3; esto nos permite registrar las tres magnitudes principales:

- **Tensiones de fase (V):** Permitiendo evaluar si los niveles de tensión de suministro hacia las cargas están dentro de los niveles de tolerancia.
- **Corrientes de fase (I):** Las tensiones de fase permiten evidenciar un desbalance de carga sobre las fases del transformador, además de verificar la disponibilidad de conducción de corriente por los alimentadores de los barrajes de carga.  
(Adicionalmente se realizan mediciones sobre el neutro).
- **Frecuencia de la red (F):** Con la frecuencia de la red, se verifica que se encuentre dentro de los valores de tolerancia.

Adicionalmente se visualizan gráficamente las variables de tensión, corriente y ángulo ( $\Phi$ ) que nos permite obtener una imagen clara de las formas de onda y sus distorsiones.

**Nota:** La medición se debería realizar idealmente en hora pico para analizar el comportamiento en el escenario máximo de demanda. Pueden tomarse varias mediciones en el mismo día o la misma hora en días diferentes.

### **Etapas 2: Caracterización de Cargas y Consumos**

Habiendo conocido las magnitudes principales del sistema eléctrico de distribución de Cenicafé, es necesario caracterizar la carga que está siendo demandada por cada uno de los edificios (1, 2 y 3) teniendo en cuenta que ésta es dinámica según el horario, mes, personal en planta e incluso el clima del día.

Estos registros y mediciones pueden darnos informaciones tales como:

- **Potencia Activa (P):** La potencia activa se considera como la potencia útil consumida por un sistema, que es usada para ejecutar un trabajo útil (movimiento, iluminación, calentamiento, etc), se representa por la letra '**P**' y se mide en vatios (W).
- **Potencia Reactiva (Q):** Es la potencia no útil requerida por un sistema de potencia que tiene existencia de elementos inductivos y capacitivos. Esta potencia es requerida por el sistema para generar campos magnéticos y campos eléctricos en estos elementos ( $L$  y  $C$ ). Se representa por la letra '**Q**' y se mide en voltioamperios reactivos (VAr)
- **Potencia Aparente (S):** Corresponde a la suma vectorial de las potencias activa y reactiva, Se representa por la letra '**S**' y se mide en voltioamperios (VA).

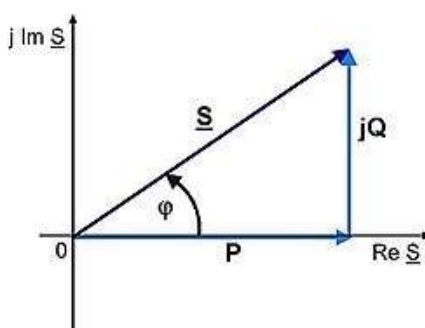


Figura 0-1. Triangulo de Potencias Eléctricas.

- **Factor de Potencia (FP):** El factor de potencia corresponde a la relación entre la potencia activa y aparente, y es el valor de control para determinar la penalización por altas potencias reactivas del usuario.

La correcta interpretación y análisis de éstos resultados permite conocer el valor y tipo de carga demandada (activa y reactiva) de cada uno de los edificios y a su vez la capacidad del transformador para soportar cargas adicionales.

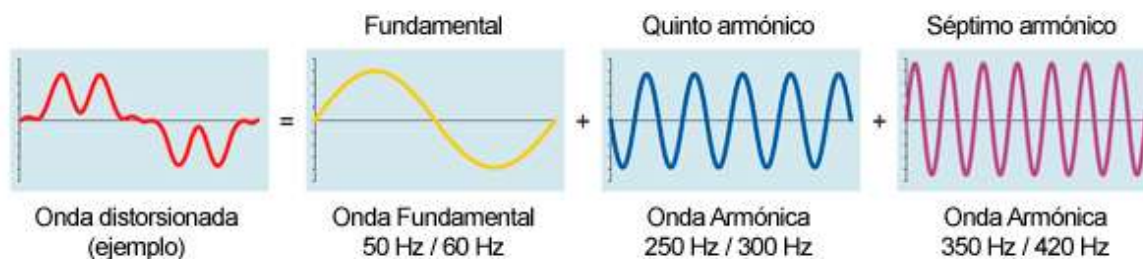
De llegarse a encontrar resultados poco favorables en el factor de potencia ( $P.F < 0.8$ ), nos daría un punto de partida para evaluar un proyecto de corrección de factor de potencia, lo cual representaría para Cenicafé:

- Evitar penalizaciones de facturación por tener un bajo factor de potencia.
- Un aumento en la capacidad del sistema dado que se disminuye la cantidad de energía reactiva demandada por el sistema.
- Disminución de pérdidas de energía en los conductores y reducción de calentamiento.
- Aumento de la vida útil de las instalaciones y equipos.
- Mejorar la regulación de tensión (Pérdidas técnicas).

**Etapla 3: Medición de Armónicos [13]**

En un sistema eléctrico de potencia con predominancia de cargas no lineales (procedentes de la electrónica de potencia) se produce un fenómeno conocido como armónicos de corriente y tensión, debido a que estos elemento demandan de la red, corrientes periódicas distorsionadas (no sinusoidales) formadas por la sumatoria de la componente fundamental de frecuencia (60 Hz) y múltiplos impares de ésta.

La siguiente imagen representa la descomposición de una forma de onda distorsionada.



*Figura 0-2. Descomposición de Onda Distorsionada*

Las principales problemáticas en un sistema de potencia con componentes armónicas, suelen ser:

- Posible resonancia (serie o paralelo).
- Efectos nocivos sobre el aislamiento de los elementos de la red.
- Mal funcionamiento del sistema o de algunos de sus componentes.
- Problemas de disparos intempestivos de protecciones.
- Bajo Factor de potencia.
- Sobredimensionamiento del sistema (Conductores, transformadores, etc).

Evidenciando la problemática que se puede tener sobre los equipos por las altas componentes armónicas, y teniendo en cuenta la gran cantidad de equipos electrónicos que están instalados actualmente en Cenicafé, es necesario realizar un análisis de las componentes armónicas en las celdas de carga de los edificios 1, 2 y 3 para dimensionar donde se encuentran las principales fuentes armónicas.



## DESARROLLO

Para el análisis de caracterización de cargas a nivel de baja tensión y conocer el comportamiento del sistema en cuanto a la calidad de la energía eléctrica, se realizó una medición de los parámetros eléctricos de la red en diferentes puntos de las edificaciones.

Como primer ejercicio, se realizó la medición por cada uno de los edificios 1, 2 y 3 de Cenicafé PlanAlto, para conocer el comportamiento de las cargas y la demanda de las mismas.

### EDIFICIO 1

Los usuarios que conforman la demanda de éste edificio, están caracterizados por ser personal administrativo de baja rotación, donde su objetivo básico consiste en brindar apoyo a los procesos misionales de investigación de la empresa.

Las principales cargas la conforman equipos de cómputo, iluminación, ventiladores, neveras, aires acondicionados y data centers que sostienen plataformas de investigación e información.

Las características de la medición se discriminan a continuación.

**Lugar:** Celda de Carga Edificio 1.

**Topología de la Medición:** 3 $\Phi$  en Estrella.

**Tensión Nominal:** 220 V AC.

**Frecuencia Nominal:** 60 Hz.

**Tiempo de registro:** 24h 0m 0s 0ms

**Intervalo de registro:** 30 s

**Cantidad de registros:** 2879



Figura 0-3. Celda de Carga Edificio 1

Los resultados obtenidos durante el registro y análisis son:

**Tensiones de Fase:**

Las tensiones de fase promedio registradas son:

$V_{L1N}$ = 124.48 V con desviación estándar  $s$ = 1.022 V

$V_{L2N}$ = 125.68 V con desviación estándar  $s$ = 0.982 V

$V_{L3N}$ = 125.27 V con desviación estándar  $s$ = 1.032 V

**Corrientes de Fase:**

Las corrientes promedio registradas son:

$I_{L1}$ = 65.35 A con desviación estándar  $s$ = 15.311 A

$I_{L2}$ = 77.28 A con desviación estándar  $s$ = 17.189 A

$I_{L3}$ = 73.92 A con desviación estándar  $s$ = 20.971 A

$I_N$ = 12.937 A con desviación estándar  $s$ = 5.931 A

**Frecuencia del sistema:**

La frecuencia registrada fue:

$F$ = 59.98 Hz con una desviación estándar  $s$ = 0.028 Hz

$F_{\text{máx}}$ = 60.08 Hz

$F_{\text{mín}}$ = 59.85 Hz

En la Figura 0-4 se muestran las cuatro gráficas capturadas de la pantalla del analizador de red, de la forma de onda de la tensión y la corriente por línea y por neutro, con el ángulo de desfase.

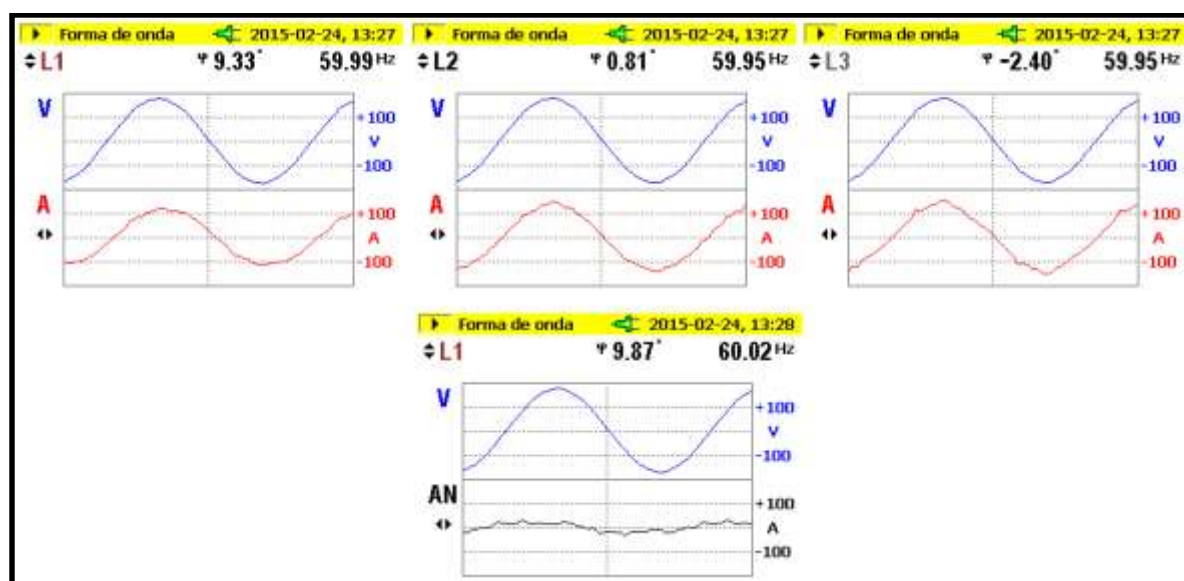


Figura 0-4. Formas de Onda de tensión y corriente Edf. 1

### Potencia Activa, Reactiva y Aparente

En la Tabla 0-1 se presentan los resultados promedio de potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia por fase y totales.

Tabla 0-1. Registro de Potencias Edf. 1

	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	F.P
L1	8010,00 s= 1829,71	975,77 s= 738,805	8124,38 s= 1856,21	0,985
L2	9674,68 s= 2110,08	-120,079 s= 425,71	9700,78 s= 2102,05	0,996
L3	9105,46 s= 2641,59	-1198,41 s= 420,45	9244,52 s= 2567,73	0,981
Total	26790,14 s= 6396,44	-342,72 s= 1432,814	27069,68 s= 6346,43	0,987

En la Figura 0-5 se presenta la curva de demanda típica obtenida durante el registro; como es de esperarse, la curva varía de forma proporcional con la hora de la jornada laboral de la empresa.

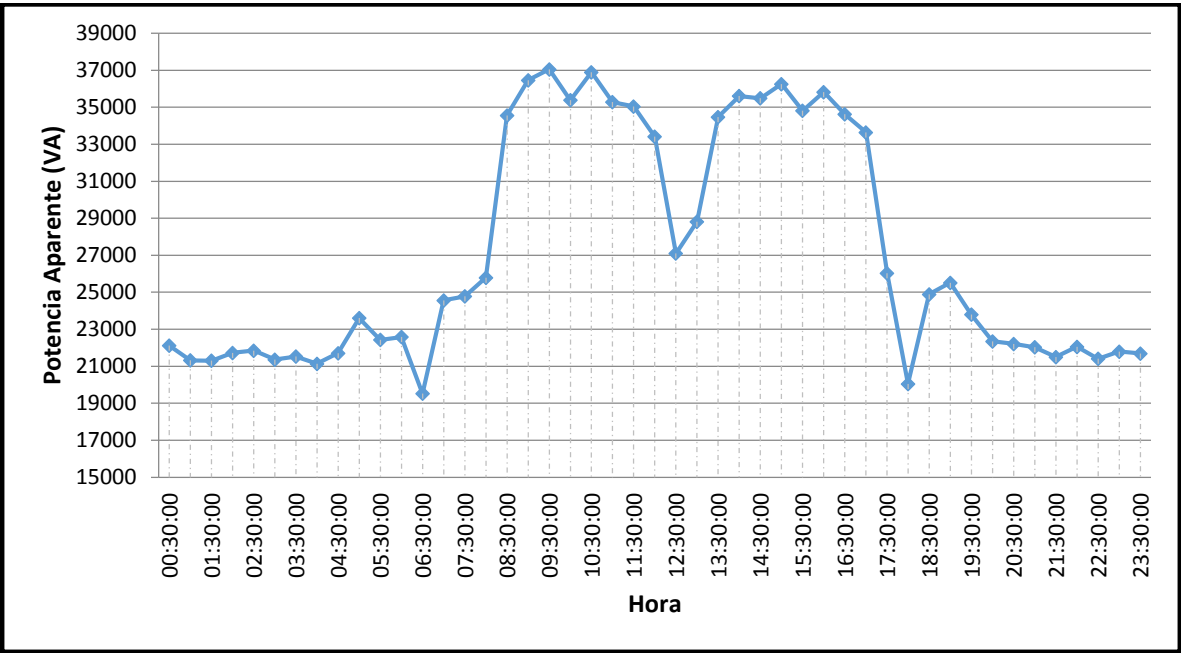


Figura 0-5. Curva de Demanda Edf. 1

En la Tabla 0-2 se presentan los valores máximos y mínimos de demandas junto con la hora de ocurrencia del evento. Solo se tienen en cuenta los valores de potencia activa y aparente, teniendo en cuenta que corresponden a la potencia que se convierte en trabajo y la real de transformación de la subestación del edificio.

Tabla 0-2. Demanda Máx, Mín (P y S) Edf. 1

	Activa (W)	Aparente (VA)	Hora
Máxima	39078	39351	10:30:00
Mínima	15564	15981	06:15:00

Componentes Armónicas de Tensión y Corriente

Las componentes de distorsión armónica en circuitos eléctricos se pueden dar tanto en tensión como en corriente, siendo ésta última la más perjudicial para el correcto funcionamiento de la red, porque tienen efectos negativos sobre esta.

En la Figura 0-6 se muestran las capturas de pantalla instantáneas del análisis de distorsión armónica de tensión generadas por el equipo.

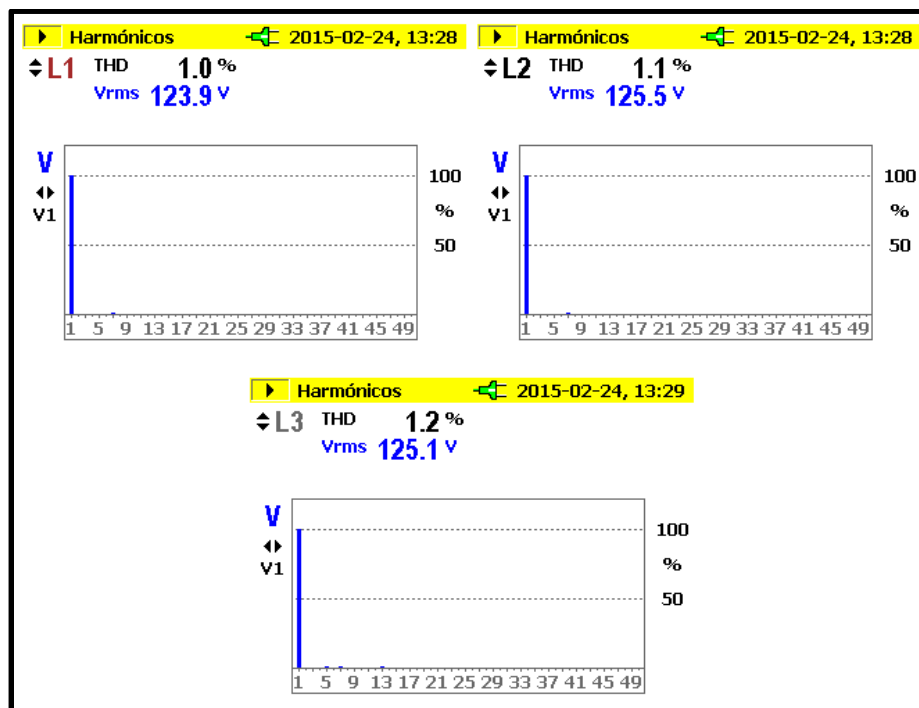


Figura 0-6. THD de Tensión Edf. 1

Gráficamente se puede evidenciar que la tensión debería tener efectos casi nulos sobre la distorsión de la forma de onda fundamental producidos por efectos armónicos. Por otro lado, el análisis generado para armónicos en corriente, se muestra en la Figura 0-7, donde se puede notar que el THD de corriente sobre las fases tiende a crecer respecto al THD de Tensión, siendo mucho más notable sobre el neutro del tablero de distribución.

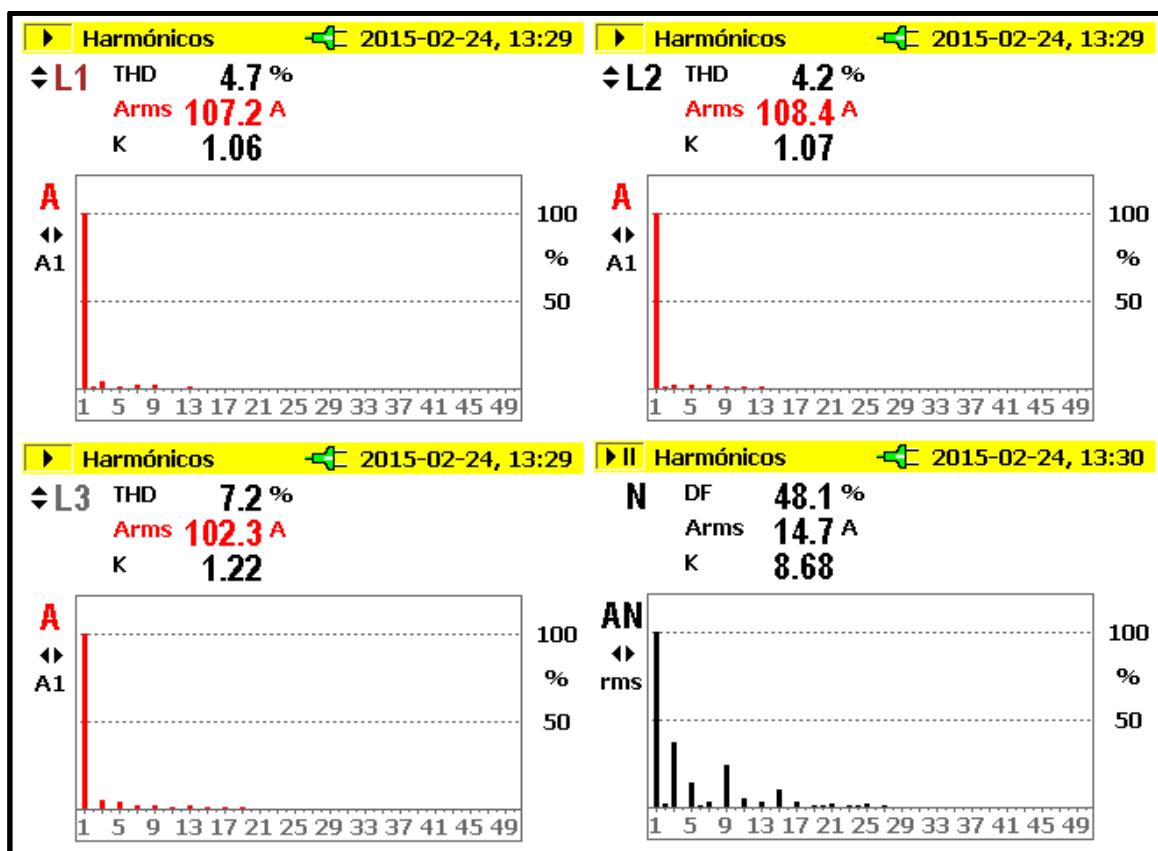


Figura 0-7. THD de Corriente Edf. 1

Teniendo en cuenta el efecto que tienen los armónicos en corriente sobre el desempeño de la red de distribución, en la Tabla 0-3 Se presenta un resumen de los THD máximos, mínimos y promedios en las corrientes de los alimentadores y del conductor de retorno (Neutro).

Tabla 0-3. THD Corriente Edf. 1.

	THD Corriente (%)		
	Promedio	Máximo	Mínimo
L1	8.7	13.9	3
L2	5.2	8.8	2.8
L3	8.5	13.7	3.6
N	69.2	99.8	12.3

En la tabla anterior se resaltan los THD de corriente por el neutro para el evento máximo, este efecto se ve debido a que la suma de las corrientes de los armónicos tiene una gran contribución sobre la corriente que retorna por el conductor, lo que podría implicar calentamiento y pérdidas en el cobre.

### Carga Equivalente Edificio 1

Para efectos de simulación se modela la carga como el promedio de la potencia activa y reactiva de un día de trabajo en semana. Donde se obtienen los siguientes datos.

$$\begin{aligned}P &= 26790.1 \text{ W} \\Q &= -342.7 \text{ VAR} \\F.P &= 0.98\end{aligned}$$

### Análisis de Resultados y Conclusiones

- Las tensiones de fase registradas se comportaron de forma estable durante los escenarios demanda variable del día correspondiente. Los niveles de tensión registrados en la celda de carga, aseguran que la regulación de tensión del circuito ramal más lejano, sea tolerable para las cargas instaladas a éste.
- Debido a que la mayoría de las cargas típicas del sistema de distribución del edificio 1 son de tipo monofásica, se evidencia un ligero desbalance de cargas entre las fases, lo que podría provocar la sobrecarga de alguna de las líneas y calentamientos del conductor de neutro si la corriente de retorno supera la capacidad de corriente correspondiente al calibre asignado. Se recomienda monitorear ocasionalmente las corrientes de fase para validar un ejercicio de simetrización de cargas en la celda de distribución general.
- La frecuencia de la red se comporta de manera estable y dentro de los parámetros recomendables para sistemas de distribución.
- Teniendo en cuenta que las demandas de potencia varían de acuerdo con la jornada laboral y analizando las demandas en escenarios máximos, se evidencia que el transformador del edificio 1 cuenta con una carga aproximada (máxima) del 40% de su capacidad nominal, lo que permite tranquilamente estudiar planes de expansión en infraestructura y cargas, siempre y cuando se tengan en cuenta la disponibilidad de instalación de circuitos en la celda de carga.
- De acuerdo con [13], los armónicos de tensión y corrientes por fase se encuentran dentro de los parámetros recomendados, sin embargo, los armónicos de corriente por el neutro producidos principalmente por el desbalanceo de cargas por fase y las cargas no lineales de la red, se encuentran por fuera de los límites recomendados y deben ser tenidos en cuenta para verificar la disponibilidad de conducción de corriente por el conductor de neutro y evitar calentamientos sobre éste.

## EDIFICIO 2

Los usuarios que conforman la demanda de éste edificio, están caracterizados por ser personal técnico de moderada rotación, donde su objetivo básico consiste en brindar apoyo a los procesos misionales de investigación de la empresa.

Las principales cargas los conforman equipos de cómputo, iluminación, ventiladores, neveras, aires acondicionados, estufas, muflas, autoclaves, equipos de instrumentación y laboratorio. Además de, soportar los compresores de aire y vacío que se distribuyen a través de la red de aire en todos los laboratorios del centro.

Las características de la medición se discriminan a continuación.

**Lugar:** Celda de Carga Edificio 2.

**Topología de la Medición:** 3Φ en Estrella.

**Tensión Nominal:** 214/124 V AC.

**Frecuencia Nominal:** 60 Hz.

**Tiempo de registro:** 168h 0m 0s 0ms

**Intervalo de registro:** 2 m 30 s

**Cantidad de registros:** 4032

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante el registro y análisis tomados para la semana de análisis (Lunes a Domingo).

### Tensiones de Fase:

Las tensiones de fase promedio registradas son:

$V_{L1N} = 124.82 \text{ V}$  con desviación estándar  $s = 1.708 \text{ V}$

$V_{L2N} = 125.35 \text{ V}$  con desviación estándar  $s = 1.763 \text{ V}$

$V_{L3N} = 125.79 \text{ V}$  con desviación estándar  $s = 1.664 \text{ V}$

### Corrientes de Fase:

Las corrientes promedio registradas son:

$I_{L1} = 79.01 \text{ A}$  con desviación estándar  $s = 17.244 \text{ A}$

$I_{L2} = 28.47 \text{ A}$  con desviación estándar  $s = 20.295 \text{ A}$

$I_{L3} = 63.55 \text{ A}$  con desviación estándar  $s = 15.997 \text{ A}$

$I_N = 22.125 \text{ A}$  con desviación estándar  $s = 5.466 \text{ A}$

Teniendo en cuenta que la dinámica de la carga produce picos (en horas de la semana) y valles (en horas del fin de semana) de corriente, estas corrientes presentan una desviación estándar muy alta, incluso llegando a tener valores máximos y mínimos por fase tales como:

$I_{L1\text{máx}} = 146.06 \text{ A}$

$I_{L1\text{min}} = 48.85 \text{ A}$

$I_{L2\text{máx}} = 137.57 \text{ A}$

$I_{L2\text{min}} = 9.014 \text{ A}$

$I_{L3\text{máx}} = 131.40 \text{ A}$

$I_{L3\text{min}} = 32.19 \text{ A}$

$I_{Nmáx} = 42.34 \text{ A}$

$I_{N\text{min}} = 5.89 \text{ A}$



**Frecuencia del sistema:**

La frecuencia registrada fue:

$F = 59.98$  Hz con una desviación estándar  $s = 0.017$  Hz

$F_{\text{máx}} = 60.08$  Hz

$F_{\text{mín}} = 59.91$  Hz

En la Figura 0-8 se presenta la captura de pantalla de las tensiones y corrientes instantáneas de fase y neutro registradas por el analizador de red.

Volts/Amps/Hertz 2015-04-08, 14:49			
↕ L123	AN	7.3 A	59.96 Hz
	V rms		A rms
L1	124.1	115.8	
L2	124.3	85.2	
L3	125.1	93.6	

Figura 0-8. Tensiones y Corrientes de fase Edf. 2

En la Figura 0-9 se presentan las gráficas capturadas de la pantalla del analizador de red, de la forma de onda de tensión y corriente por fase, con el ángulo de desfase.



Figura 0-9. Forma de Onda de Tensión y Corriente Edf. 2

### Potencia Activa, Reactiva y Aparente

En la Tabla 0-4 se presentan los resultados promedios de potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia promedios por fase y totales.

Tabla 0-4. Registro de Potencias Edf. 2

	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	F.P
<b>L1</b>	9411.07 s= 2076.6	2714.18 s= 774.13	9846.84 s= 2071.93	0,953
<b>L2</b>	3378.36 s= 2446.1	712.86 s= 763.19	3549.34 s= 2488.69	0,945
<b>L3</b>	6333.61 s= 2017.78	4726.58 s= 854.97	7980.35 s= 1948.27	0,782
<b>Total</b>	19121.7 s= 6128.55	8153.63 s= 1796.39	21376.5 s= 6058.35	0,893

En la Figura 0-10 se presenta un gráfico del comportamiento de la potencia aparente registrado contra el número de eventos de ocurrencia de éste. Con éste análisis estadístico podemos evidenciar que la potencia aparente total del sistema del edificio 2, se encuentra típicamente entre los valores de 16 kVA y 22 kVA, lo cual justifica disponibilidad de instalación de cargas al transformador de ésta sección.

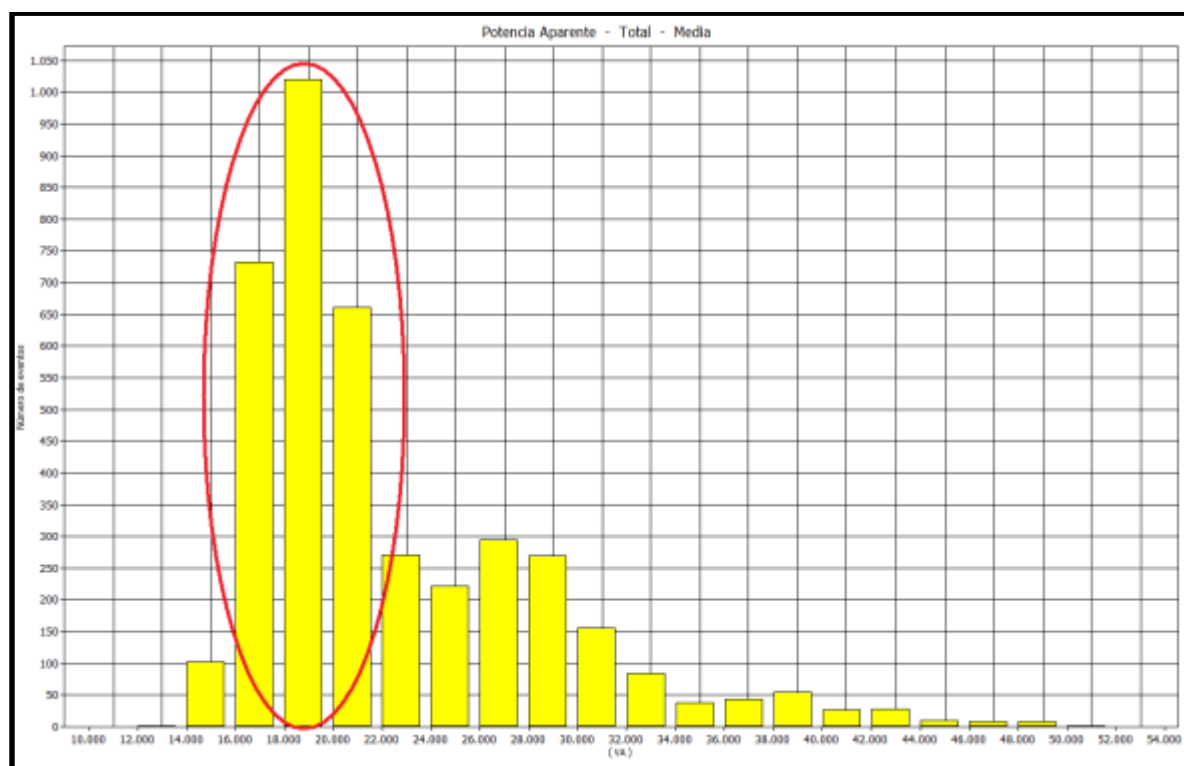


Figura 0-10. Potencia Aparente Vs. Ocurrencia Edf. 2

Por otro lado, para el análisis estadístico entre el factor de potencia contra la ocurrencia de eventos, se presentan dos escenarios donde los valores entre 0.855 y 0.895 y entre 0.935 y 0.955 tienen mayor predominancia, siendo el primer rango el más notable.

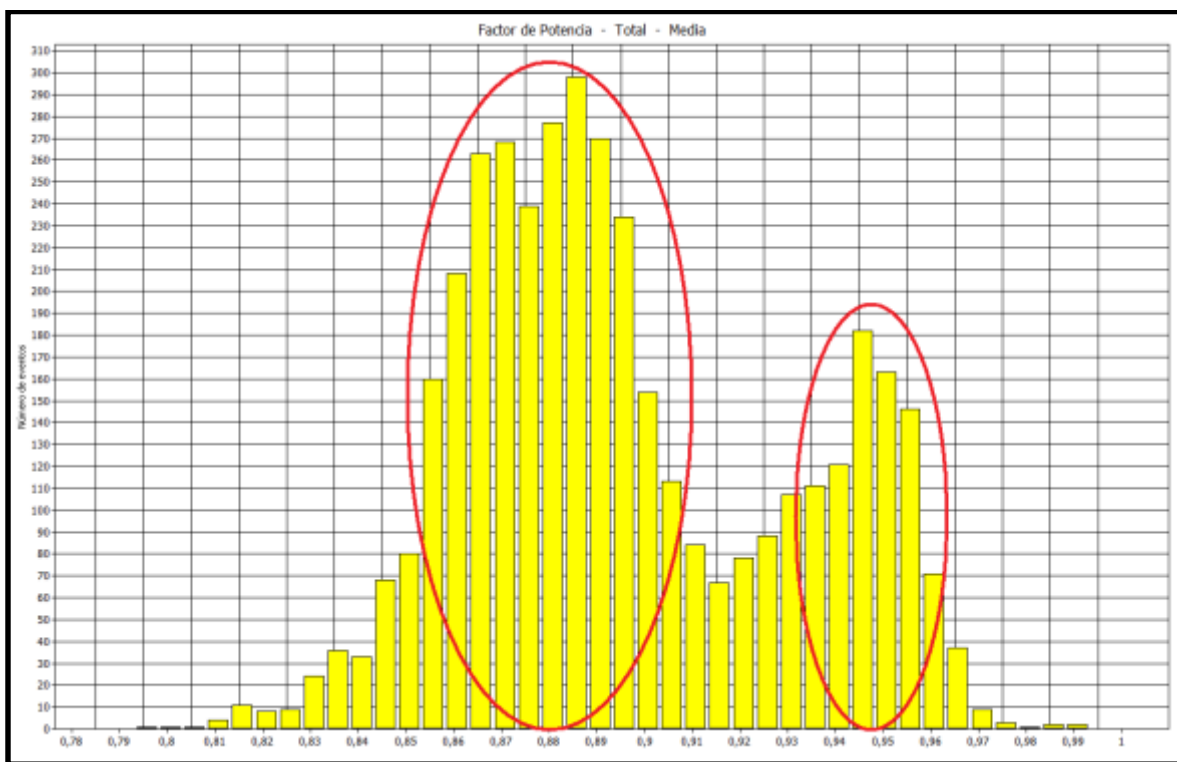


Figura 0-11. F.P Vs. Ocurrencia Edif. 2

Teniendo en cuenta que la demanda de los usuarios para el caso de estudio del edificio 2, tiende a ser variable dentro de la jornada laboral para los diferentes días, se registran las mediciones de P, Q y S por fase, dentro de la semana del 2015-04-13 al 2015-04-19, obteniendo los resultados presentes en la Figura 0-12.

Se puede evidenciar un comportamiento muy uniforme entre los días de la semana exceptuando el jueves, donde la demanda crece considerablemente respecto a las demás. Por otro lado, los días sábado y domingo aportan una baja demanda para el transformador de potencia.

Con la Figura 0-13 se resaltar el comportamiento brusco que presenta el perfil de Potencia Activa del sistema de potencia del Edif. 2 debido principalmente por el arranque directo del compresor y la bomba de vacío que distribuye los sistemas de presión y vacío a los laboratorios del Centro.

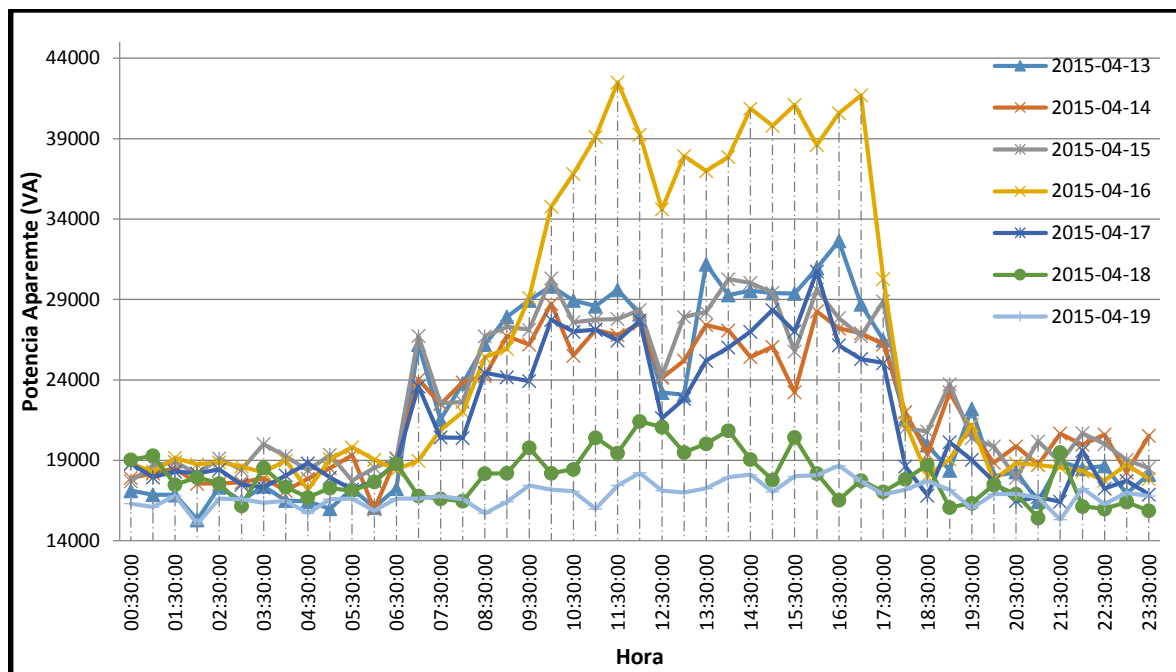


Figura 0-12. Curva de Demanda Edif. 2

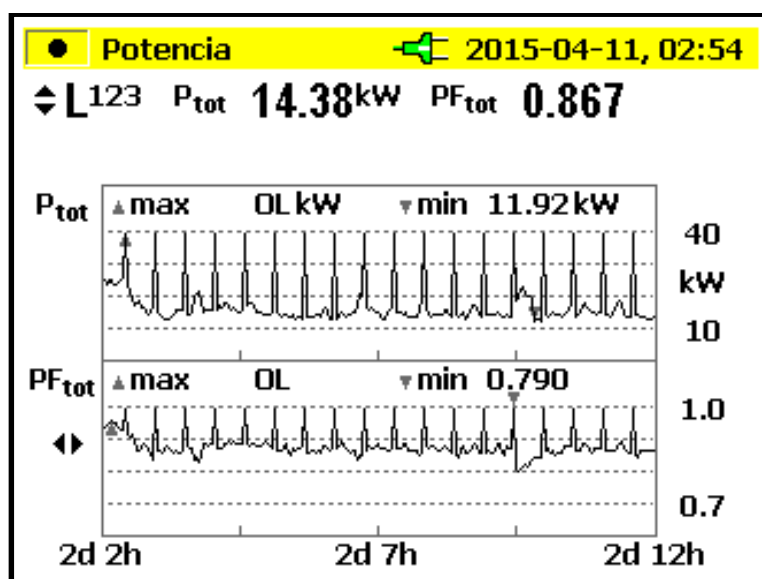


Figura 0-13. Perfil de Demanda Edif. 2

En la Tabla 0-5 se presentan las demandas máximas y mínimas de Potencia activa y aparente con la fecha y hora en la cual se registraron los eventos.

Tabla 0-5. Demanda Máx. Mín (P y S) Edf. 2

	Activa (W)	Aparente (VA)	Fecha y Hora
Máxima	45958.10	50072.73	2015-04-09 02:07:12 pm
Mínima	10955.45	12773.45	2015-04-18 06:32:12 pm

### Componentes Armónicos de Tensión y Corriente

En la Figura 0-14 se muestran las capturas de pantalla instantáneas del análisis de distorsión armónica en tensión generadas por el equipo.

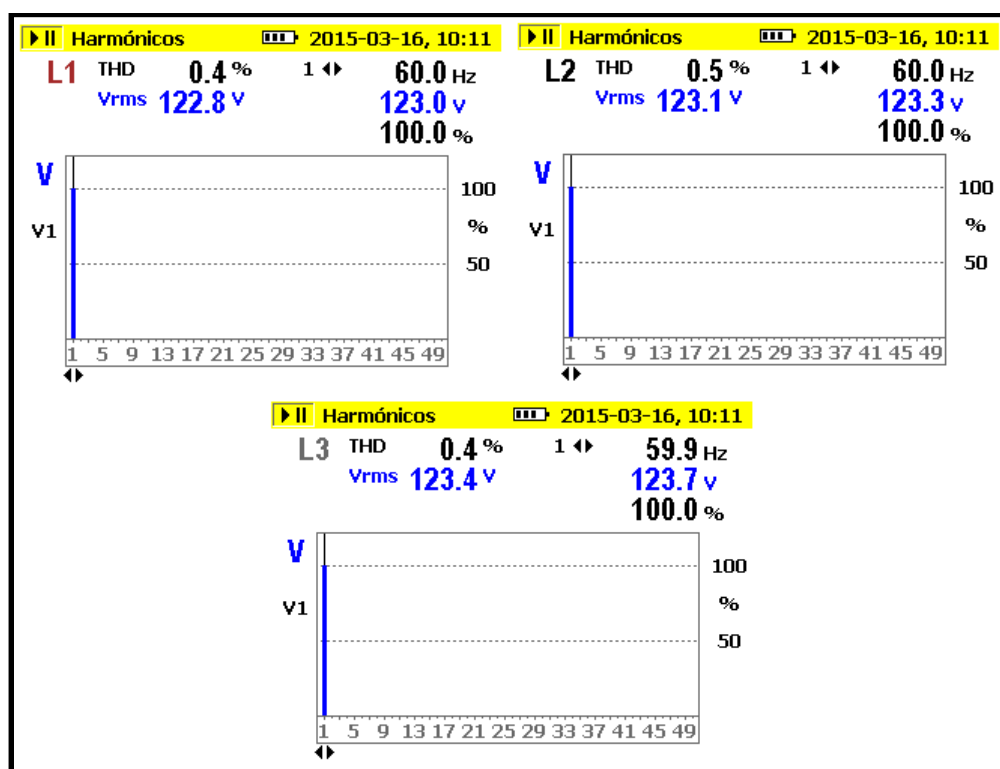


Figura 0-14. THD de Tensión Edf. 2

Se observa que las componentes armónicas en tensión son casi nulas y no tendrían efecto en la distorsión de la forma de onda fundamental de tensión de 60 Hz.

Por otro lado, el análisis generado para armónicos en corriente se muestra en la Figura 0-15, donde se puede notar que el THD de corriente sobre las fases tiende a crecer respecto al THD de Tensión, siendo mucho más notable sobre el neutro del tablero de distribución general.

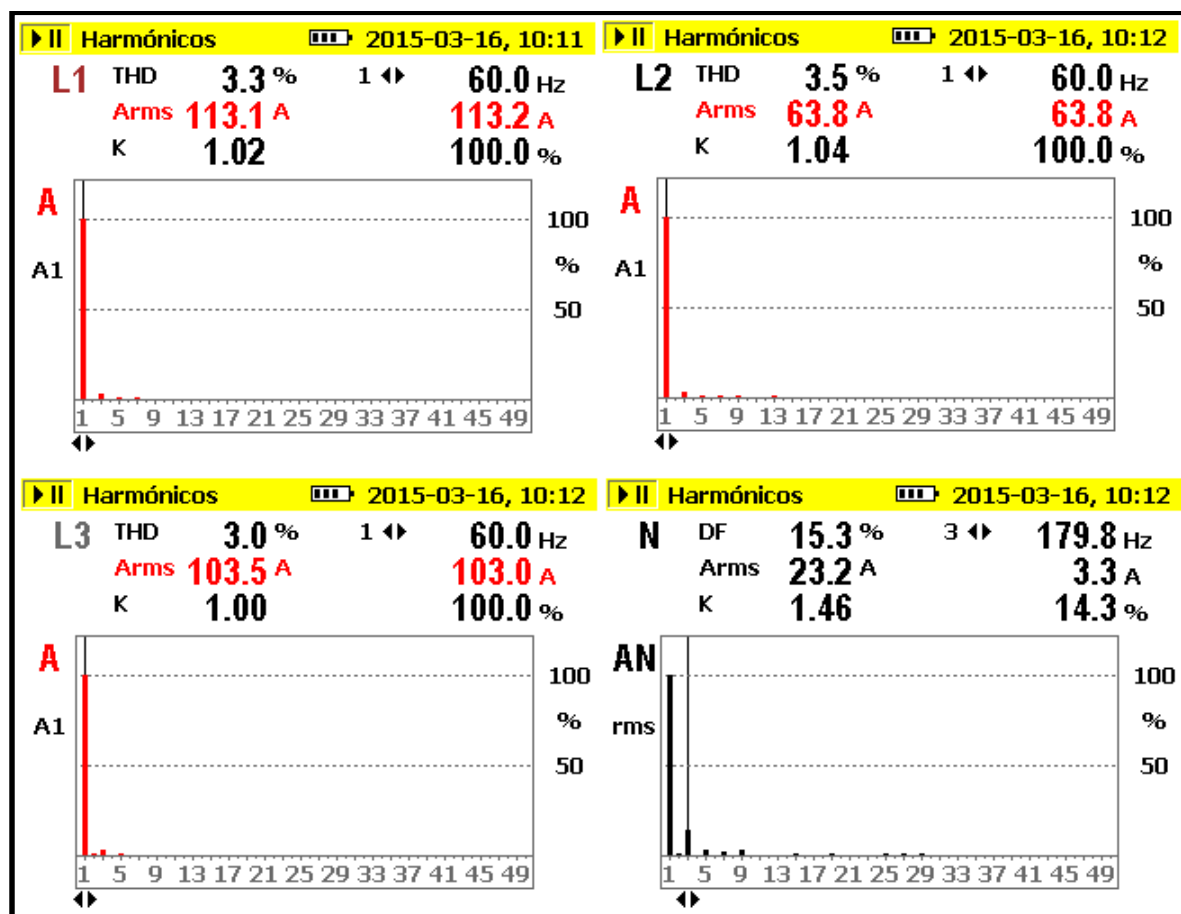


Figura 0-15. THD de Corriente Edf. 2

Teniendo en cuenta que la contribución de los armónicos tiende a cambiar temporalmente con el comportamiento variable de la carga, en la Tabla 0-6 se realiza el resumen de los valores máximos, mínimos y promedios de los THD de tensión y corriente registrados para la semana.

Tabla 0-6. THD de Tensión y Corriente AVG. Máx y Mín Edf. 2

	THD de Tensión (%)			THD de Corriente (%)		
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo
L1	0.73	1.5	0.2	5.05	10.7	1.6
L2	0.85	1.7	0.2	17.63	35.4	1
L3	0.78	1.4	0.2	5.40	9.7	2
N	No reg.	No reg.	No reg.	21.81	89.6	7.6

Como se observó en los diagramas de Potencia y F.P vs ocurrencia de eventos, éste mismo análisis podría hacerse en THD, donde se nota un comportamiento de una ocurrencia muy distribuida de los valores de THD de Corriente de la Fase 2 que están entre los rangos 4% a 8% y 20% a 29%, como se muestra en la siguiente ilustración.

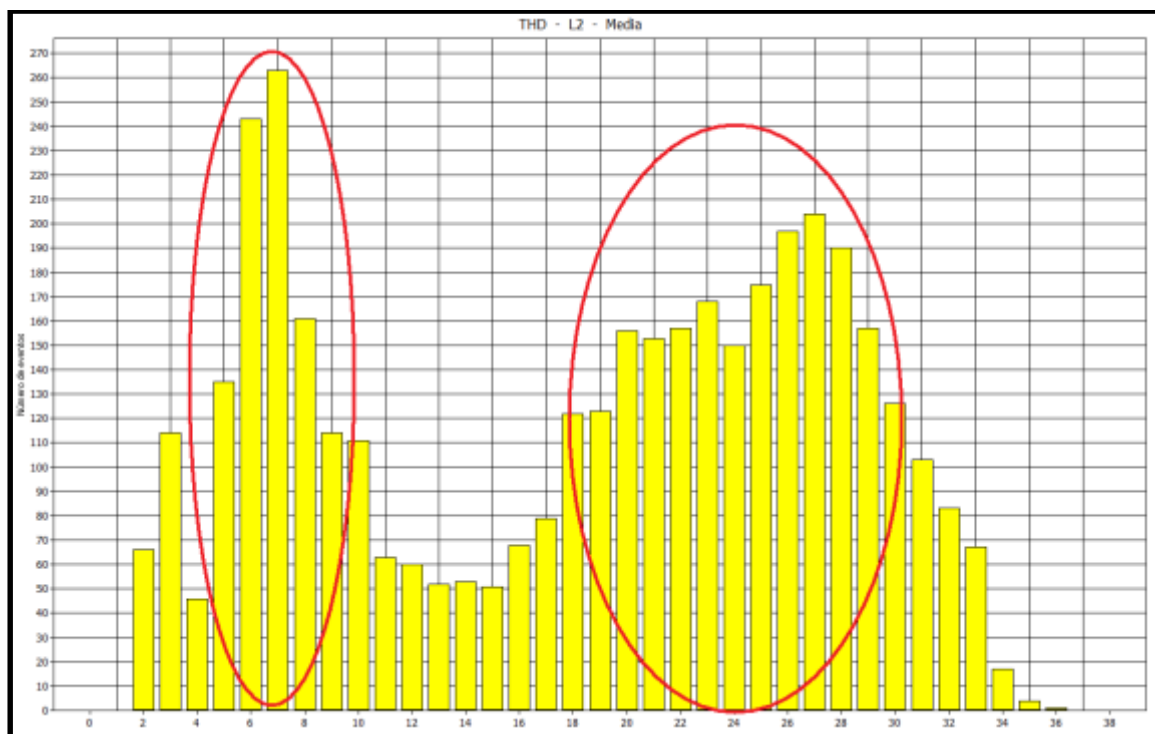


Figura 0-16. THD Corriente L2 Vs. Ocurrencia Edif. 2

### Carga Equivalente Edificio 2

La carga equivalente 3Φ del sistema se modela como el promedio de Potencia Activa y Reactiva total de los días entre semana (L-V), donde se obtiene el siguiente modelo equivalente.

$$\begin{aligned}
 P &= 20907.2 \text{ W} \\
 Q &= 8325.8 \text{ VAR} \\
 F.P &= 0.929
 \end{aligned}$$

### **Análisis de Resultados y Conclusiones**

- Las tensiones de fase registradas se comportaron de forma estable durante los escenarios demanda variable del día correspondiente. Los niveles de tensión registrados en la celda de carga, aseguran que la regulación de tensión del circuito ramal más lejano, sea tolerable para las cargas instaladas a éste.
- Al igual que en el análisis del edificio 1, se encuentra un desbalance en potencias monofásicas debido a la instalación de cargas monofásicas a los tableros de circuitos ramales, siendo predominante el desbalance en la Fase 2. Se recomienda monitorear ocasionalmente las corrientes de fase para validar un ejercicio de simetrización de cargas en la celda de distribución general del Edf. 2.
- La frecuencia de la red se comporta de manera estable y dentro de los parámetros recomendables para sistemas de distribución.
- De acuerdo con el comportamiento variable de la demanda entre días y horario de jornada laboral, el transformador del edificio 2 puede llegar a tener en escenarios máximos de demanda, una carga del 40% de su capacidad nominal, lo que permite tranquilamente estudiar planes de expansión en infraestructura y cargas, siempre y cuando se tengan en cuenta la disponibilidad de instalación de circuitos en la celda de carga y el calibre de los conductores alimentadores.
- Dentro del análisis del perfil de potencia mostrado en la Figura 0-13, se somete a consideración el alto consumo de los equipos de Compresión y Vacío de Aire debido a su arranque directo; lo cual, justifica un estudio del comportamiento eléctrico de éstas cargas para validar adecuaciones tales como arrancadores y variadores de velocidad o actualización de los equipos por tecnología de mayor eficiencia energética.
- De acuerdo con las referencias de [13], los armónicos de tensión y corrientes por fase se encuentran dentro de los parámetros recomendados, sin embargo, los armónicos de corriente por el neutro producidos principalmente por el desbalanceo de cargas por fase y las cargas no lineales de la red, se encuentran por fuera de los límites recomendados y deben ser tenidos en cuenta para verificar la disponibilidad de conducción de corriente por el conductor de neutro y evitar calentamientos sobre éste.



### EDIFICIO 3

Al igual que en el edificio 2, los usuarios que conforman la demanda de éste edificio, están caracterizados por ser personal técnico de moderada rotación, donde su objetivo básico consiste en brindar apoyo a los procesos misionales de investigación de la empresa.

Las principales cargas los conforman equipos de cómputo, iluminación, ventiladores, neveras, aires acondicionados, equipos de temperatura (autoclaves, estufas, muflas...) y equipos de laboratorio e instrumentación.

Las características de la medición se discriminan a continuación.

**Lugar:** Celda de Carga Edificio 3.

**Topología de la Medición:** 3Φ en Estrella.

**Tensión Nominal:** 214/124 V AC.

**Frecuencia Nominal:** 60 Hz.

**Tiempo de registro:** 168h 0m 0s 0ms

**Intervalo de registro:** 2 m 30 s

**Cantidad de registros:** 4032

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante el registro y análisis tomados para la semana de análisis (Sábado – Domingo, Lunes a Viernes).

#### Tensiones de Fase:

Las tensiones de fase promedio registradas son:

$V_{L1N} = 129.04 \text{ V}$  con desviación estándar  $s = 2.124 \text{ V}$

$V_{L2N} = 129.76 \text{ V}$  con desviación estándar  $s = 1.916 \text{ V}$

$V_{L3N} = 128.84 \text{ V}$  con desviación estándar  $s = 1.887 \text{ V}$

#### Corrientes de Fase:

Las corrientes promedio registradas son:

$I_{L1} = 88.68 \text{ A}$  con desviación estándar  $s = 37.890 \text{ A}$

$I_{L2} = 102.92 \text{ A}$  con desviación estándar  $s = 36.619 \text{ A}$

$I_{L3} = 121.07 \text{ A}$  con desviación estándar  $s = 26.097 \text{ A}$

$I_N = 36.41 \text{ A}$  con desviación estándar  $s = 10.077 \text{ A}$

Teniendo en cuenta que la dinámica de la carga produce picos (en horas de la semana) y valles (en horas del fin de semana) de corriente, estas corrientes presentan una desviación estándar muy alta, incluso llegando a tener valores máximos y mínimos por fase tales como:

$I_{L1\text{máx}} = 222.24 \text{ A}$

$I_{L1\text{min}} = 40.77 \text{ A}$

$I_{L2\text{máx}} = 230.30 \text{ A}$

$I_{L2\text{min}} = 45.805 \text{ A}$

$I_{L3\text{máx}} = 201.87 \text{ A}$

$I_{L3\text{min}} = 63.532 \text{ A}$

$I_{N\text{máx}} = 68.51 \text{ A}$

$I_{N\text{min}} = 9.91 \text{ A}$

**Frecuencia del sistema:**

La frecuencia registrada fue:

$F = 59.98$  Hz con una desviación estándar  $s = 0.017$  Hz

$F_{\text{máx}} = 60.05$  Hz

$F_{\text{mín}} = 59.91$  Hz

En la Figura 0-17 se presenta la captura de pantalla de las tensiones y corrientes instantáneas de fase y neutro registradas por el analizador de red.

▶ II Volts/Amps/Hertz 2015-04-17, 17:04		
↕ L123	AN 16.9 A	59.96 Hz
	V rms	A rms
L1	127.4	105.4
L2	128.3	110.3
L3	127.9	115.2

Figura 0-17. Tensión y Corriente de Fase Edf. 3

En la Figura 0-18 se muestran las formas de onda de tensión y corriente de fase, con su respectivo desfase. Se puede notar entre las tres, que la corriente de fase de la L1 puede tener un comportamiento armónico mayor debido a que su forma de onda presenta una notable distorsión.



Figura 0-18. Formas de Onda Tensión y Corriente Edf. 3

En la Tabla 0-7 se presentan los resultados promedios de potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia promedios por fase y totales (Durante toda la semana).

Tabla 0-7. Registro de Potencias Edf. 3

	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	F.P
<b>L1</b>	10017.30 s= 4251.17	5268.71 s= 2158.04	11384.2 s= 4693.23	0.874
<b>L2</b>	12175.90 s= 4839.2	5012.86 s= 976.76	13309.1 s= 4581.73	0,899
<b>L3</b>	13178.20 s= 3364.14	8091.86 s= 1327.94	15569.1 s= 3205.52	0,838
<b>Total</b>	35371.40 s= 12151.9	18373.4 s= 2911.5	40262.4 s= 12031	0,871

En la Figura 0-19 se muestra el comportamiento de la potencia aparente registrado contra el número de eventos de ocurrencia de este. Con este análisis estadístico podemos evidenciar que la potencia aparente total del sistema del edificio 3, se encuentra típicamente entre los valores de 27 kVA y 37 kVA en mayor ocurrencia, y un segundo rango entre 55 kVA y 65 kVA en menor ocurrencia.

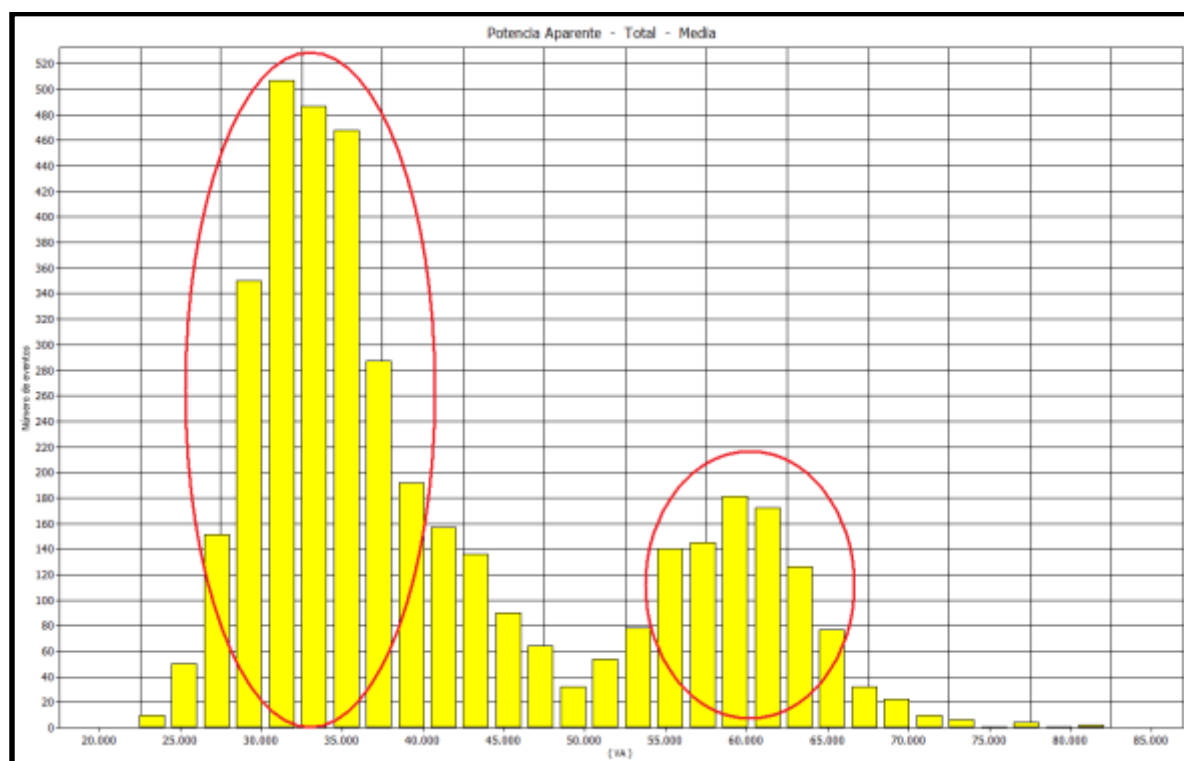


Figura 0-19. Potencia Aparente Vs. Ocurrencia Edf. 3

Para el análisis estadístico del comportamiento del Factor de Potencia con respecto a la ocurrencia de eventos en el Edificio 3, se nota una distribución mas pronunciada entre los rangos de 0.82 a 0.88 y 0.91 a 0.93, siendo este último el de mayor ocurrencia.

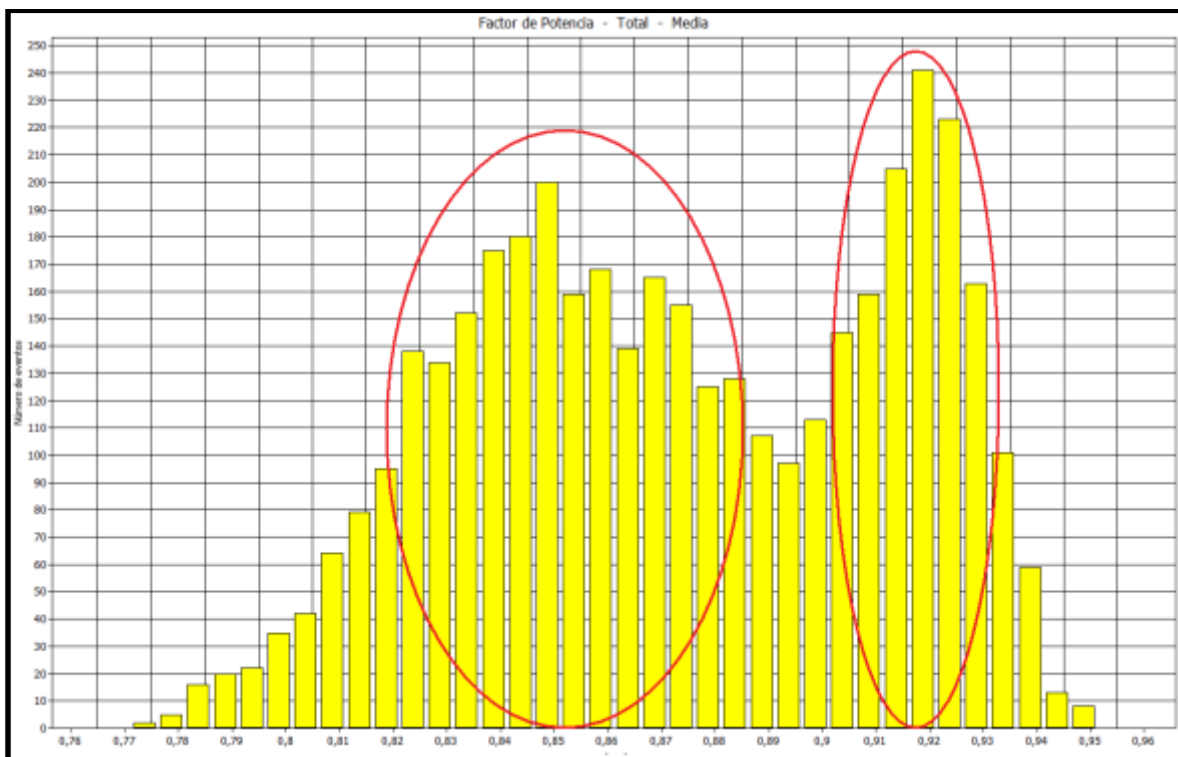


Figura 0-20. FP Vs. Ocurrencia Edf. 3

En la Figura 0-21 se presenta el comportamiento de la curva de demanda diaria del Edificio 3 de una semana completa, donde se evidencia un comportamiento muy similar de la demanda entre los días de la semana (L-V) pero con una mayor cargabilidad del transformador respecto a los del edificio 1 y 2.

La carga del edificio 3 puede ser más representativa que las de los edificios 1 y 2 debido a que se presenta una mayor cantidad de equipos de refrigeración y de temperatura (Autoclaves, Muflas, Estufas), que efectúan una mayor demanda sobre el transformador del circuito.

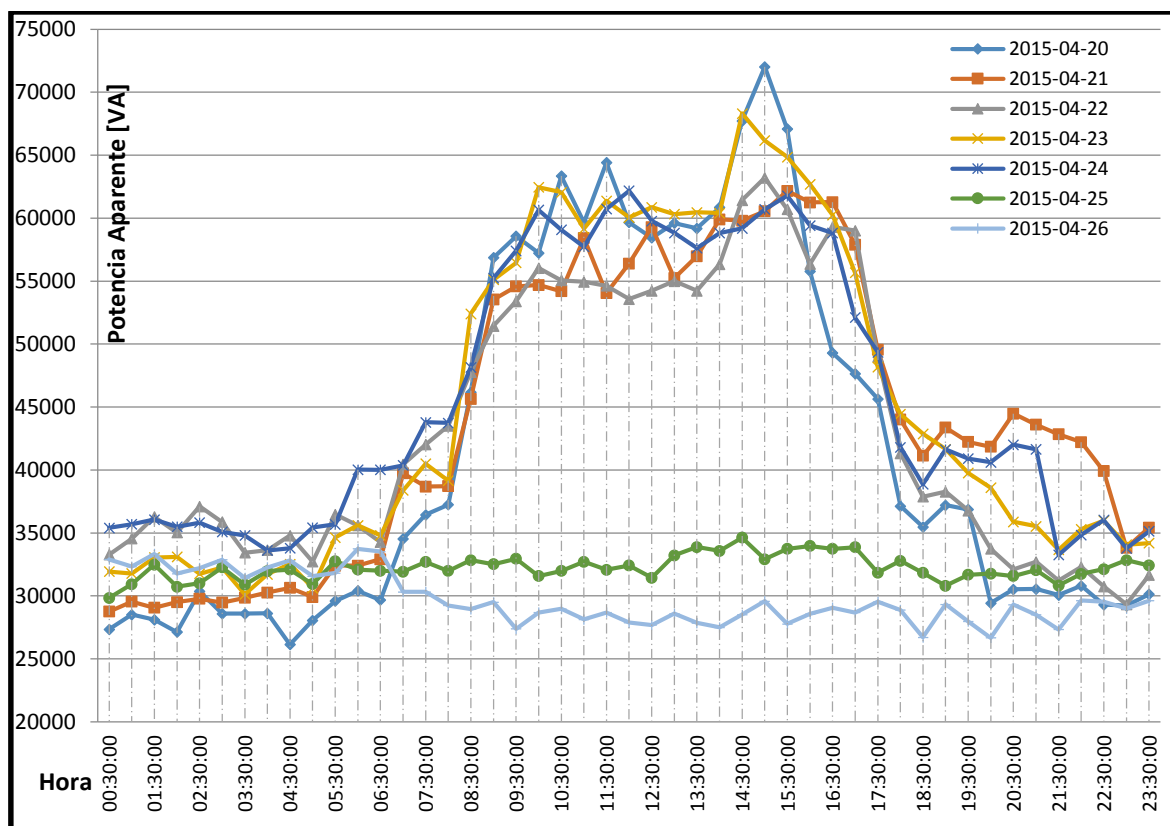


Figura 0-21. Curva de Demanda Edf. 3

En la Tabla 0-8 se presentan los valores de demanda máx y mín de potencia activa, aparente y la hora de ocurrencia.

Tabla 0-8. Demanda Máx. Mín (P y S) Edf. 3

	Activa (W)	Aparente (VA)	Fecha y Hora
Máxima	73875.27	79476.55	2015-04-20 02:48:13 pm
Mínima	17640	21264.55	2015-04-20 04:05:43 am

### Componentes Armónicos de Tensión y Corriente

En la Figura 0-22 de acuerdo a los análisis de componentes armónicas registradas en pantalla se puede observar que no hay influencia significativa sobre la forma de onda de tensión de las fases L1, L2 y L3.

De acuerdo con la Figura 0-23 y teniendo en cuenta los resultados de forma de onda de corriente, se puede ratificar el hecho que la corriente de la L1 es la de mayor componente armónica entre las fases del transformador; a su vez, se nota la alta influencia de componente de tercer armónico sobre el neutro del condensador. Los valores promedio de estas magnitudes serán analizados más adelante.

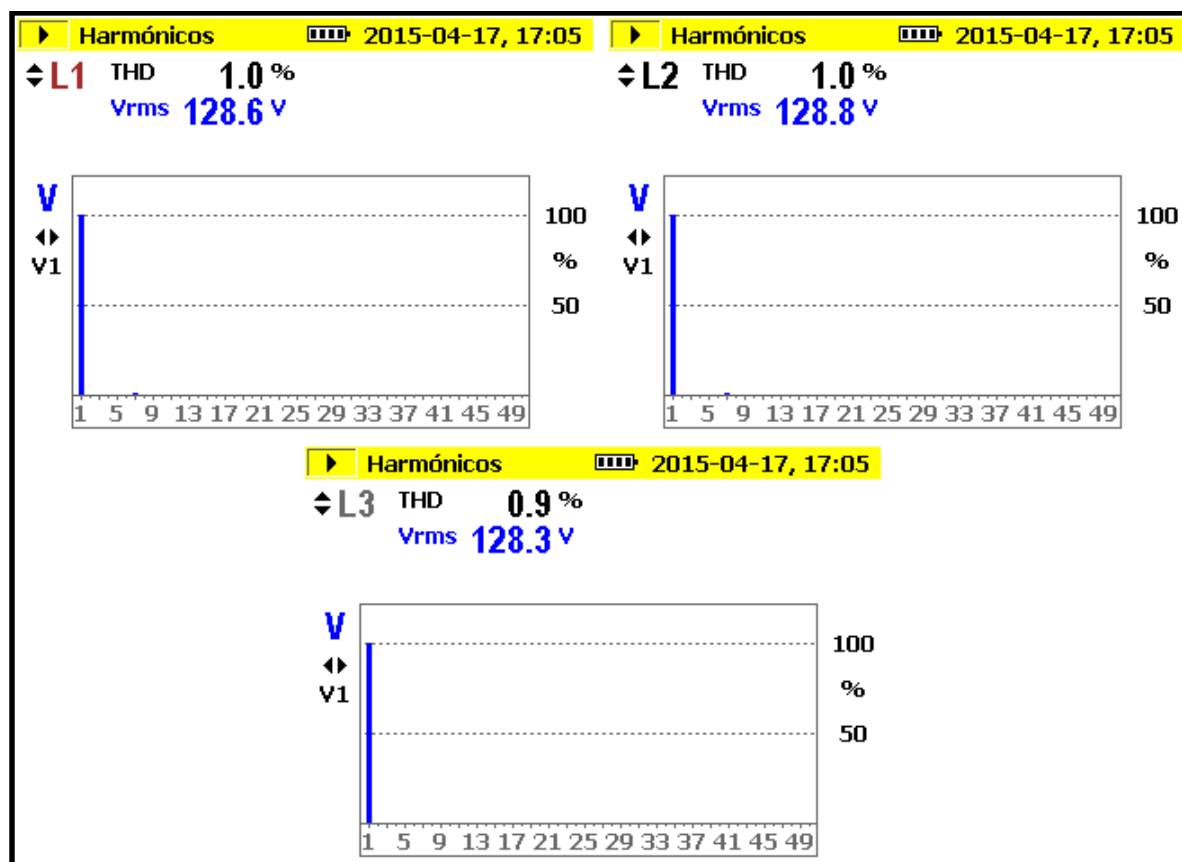


Figura 0-22. THD de Tensión Edf. 3

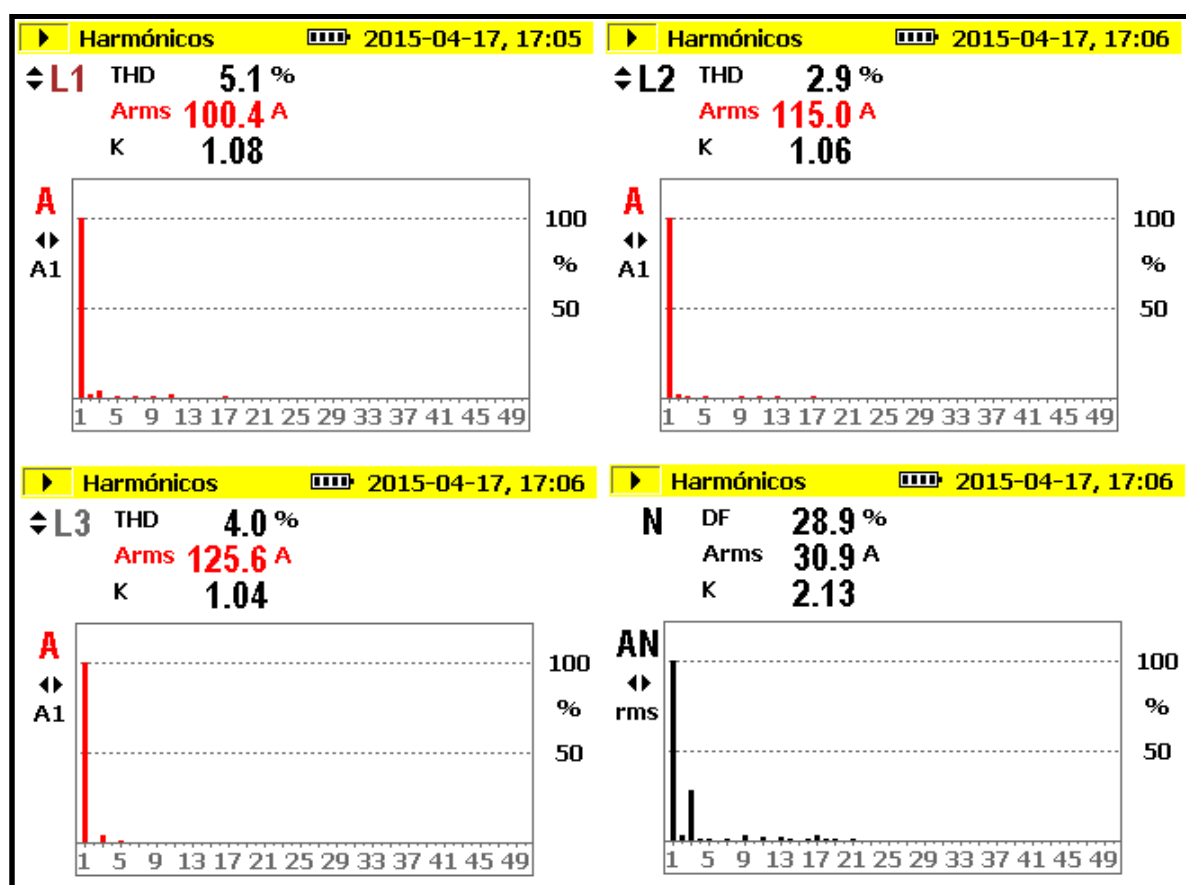


Figura 0-23. THD de Corriente Edf. 3

Teniendo en cuenta que la contribución de los armónicos tiende a cambiar temporalmente con el comportamiento variable de la carga, en la Tabla 0-9 se realiza el resumen de los valores máximos, mínimos y promedios de los THD de tensión y corriente registrados para la semana.

Tabla 0-9. THD de Tensión y Corriente AVG, Máx y Mín Edf. 3

	THD de Tensión (%)			THD de Corriente (%)		
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo
L1	1.14	2.1	0.3	7.01	13.00	2.7
L2	1.07	2.1	0.3	4.63	11	1.1
L3	0.79	1.7	0.2	3.44	6.2	1.7
N	No reg.	No reg.	No reg.	28.14	95.5	8.7

En la Figura 0-24 se puede observar el comportamiento del valor de THD de corriente en el Neutro contra los valores de ocurrencia, se nota una mayor repetibilidad entre los valores de 15 y 35.

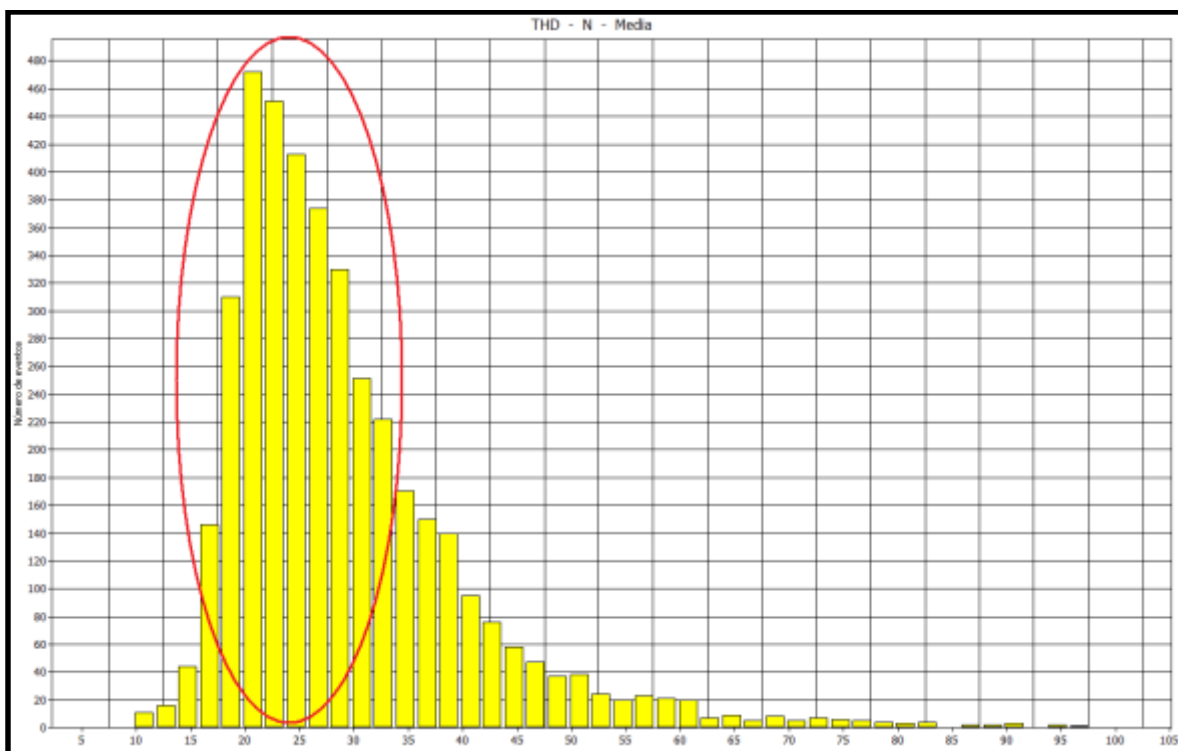


Figura 0-24. THD Corriente Neutro vs Ocurrencia Edif. 3

### Carga Equivalente Edificio 3

La carga equivalente 3 $\Phi$  del sistema se modela como el promedio de Potencia activa y reactiva total de los días entre semana (L-V), donde se obtiene el siguiente modelo equivalente.

$$\begin{aligned} P &= 39082 \text{ W} \\ Q &= 19225.7 \text{ VAR} \\ \text{F.P} &= 0.897 \end{aligned}$$



## Análisis de Resultados y Conclusiones

- Los perfiles de tensiones de fase registradas se comportaron de forma estable durante los escenarios demanda variable del día correspondiente. Los niveles de tensión registrados en la celda de carga, superan los valores nominales del transformador y podrían estar cerca de los umbrales máximos de tolerancia de tensión de los equipos conectados. Se recomienda verificar la posición del TAP del transformador.
- De acuerdo con las corrientes de fase promedio se nota un ligero desbalance de cargas sobre las fases, lo cual podría producir junto con los fenómenos armónicos, corrientes significativas sobre el conductor del neutro.
- La frecuencia de la red se comporta de manera estable y dentro de los parámetros recomendables para sistemas de distribución.
- Teniendo en cuenta que las demandas de potencia varían de acuerdo con la jornada laboral y analizando las demandas en escenarios máximos, se evidencia que el transformador del edificio 3 cuenta con una carga aproximada (máxima) del 70% de su capacidad nominal, lo que permite estudiar planes de expansión en infraestructura y cargas, siempre y cuando se tengan en cuenta la disponibilidad de instalación de circuitos en la celda de carga y la capacidad de corriente de los alimentadores.
- De acuerdo con las referencias de [13], los armónicos de tensión y corrientes por fase se encuentran dentro de los parámetros recomendados, sin embargo, los armónicos de corriente por el neutro producidos principalmente por el desbalanceo de cargas por fase y las cargas no lineales de la red, se encuentran por fuera de los límites recomendados y deben ser tenidos en cuenta para verificar la disponibilidad de conducción de corriente por el conductor de neutro y evitar calentamientos sobre éste.
- De acuerdo con la Figura 0-20 se tiene que el factor de potencia promedio trifásico del edificio 3, está por el orden de 0.88, siendo éste un valor fuera del tolerado dentro de la Normativa de usuarios no regulados, sin embargo, teniendo en cuenta que la ocurrencia dominante de eventos está dentro del rango de  $0.9 < F.P < 0.93$ , la corrección del factor de potencia en el sistema de potencia del Edf. 3 no tendría mayor representación sobre la confiabilidad del sistema.

## RESUMEN DE RESULTADOS

De acuerdo con los resultados encontrados en los análisis previos, para efectos de simulación de flujos de potencia se modelarán las cargas de cada uno de los edificios de la siguiente forma.

*Tabla 0-10. Modelo de Cargas Edf. 1, 2 y 3*

	<b>P [W]</b>	<b>Q [VAR]</b>	<b>F.P.</b>
<b>Edf. 1</b>	26790.1	-342.7	0.98
<b>Edf. 2</b>	20907.2	8325.8	0.929
<b>Edf. 3</b>	39082	19225.7	0.8997

## ANÁLISIS DE ESTADO ESTABLE Y ESTADO TRANSITORIO DEL SISTEMA DE POTENCIA ELÉCTRICO 13.2 kV DE CENICAFE

### OBJETIVO GENERAL

Modelar el sistema de potencia eléctrico de la red de 13.2 kV de Cenicafé en conjunto con la información de la caracterización de cargas resultante del 0, para realizar el análisis de estado estable del sistema y el estado transitorio en actividades de maniobra

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Encontrar los modelos equivalentes de la red de distribución de 13.2 kV de Cenicafé, incluyendo los elementos que lo conforman.
- Integrar el estudio de caracterización de cargas junto con el modelo equivalente.
- Simulación y análisis del estado estable de la red actual y en proyecciones de escenarios de demanda.
- Simulación de estado transitorio del sistema ante operaciones de maniobra sobre la red y el usuario.
- Diagnosticar la capacidad de respuesta de Cenicafé y el comportamiento del sistema de potencia ante diferentes escenarios de demanda.

### HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

- Para simulaciones de estado estable: NEPLAN
- Para simulaciones de estado Transitorio: ATP

### DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA 13.2 kV [6]

Partiendo desde la S/E de Cenicafé 33/13.2 kV, la red se divide en dos ramales que energizan dos secciones del centro de investigación: **PlanAlto** (parte alta) y **La Granja** (parte baja).

La red de **PlanAlto** energiza 3 transformadores, cada uno de 150 kVA con relación de transformación de 13.2/0.208 kV que cubren la demanda de las cargas de los edificios 1, 2 y 3; mientras que la red de **La Granja** energiza dos transformadores de 225 kV y 112.5 kV (relación 13.2/0.208 kV) que alimentan los circuitos del proceso de beneficio agrícola, oficinas de investigación y laboratorios.

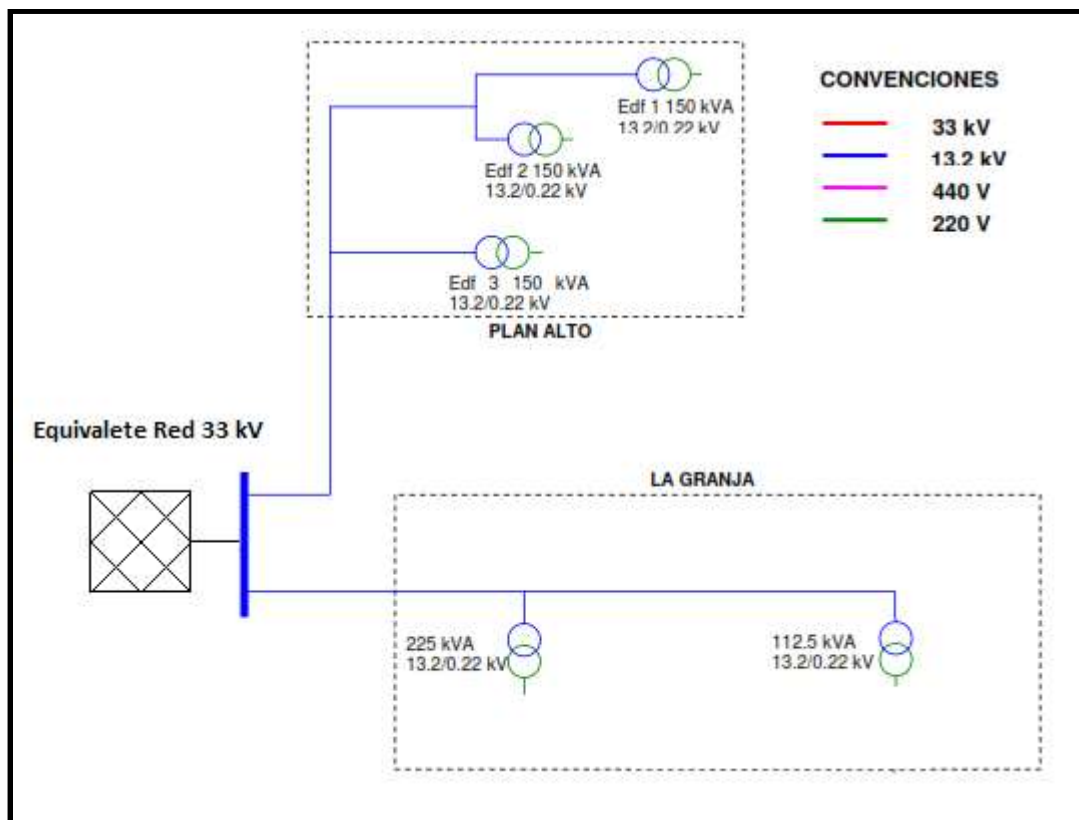


Figura 0-1. Red de Distribución 13.2 kV

Los elementos que conforman el sistema de distribución de 13.2 kV son:

- **Subestación Eléctrica Cenicafé**

Transformación: 33 kV a 13.2 kV (Reductora)

Ubicación: Reserva forestal PlanAlto

Potencia Nominal: 500 kVA.

Descripción: La subestación reductora se encuentra energizada por la línea de 33 kV de que parte desde subestación Chinchiná. Cuenta con salidas en dos circuitos de 13.2 kV que energizan los transformadores de PlanAlto y La Granja, junto con un sistema de transferencia automático para energizar por Planta Eléctrica (cap. 500 kW) ante contingencia de la red de 33 kV o el transformador.

- **Líneas de distribución 13.2 kV**

Ubicación: Con dos derivaciones, los circuitos atraviesan la reserva Forestal hasta la entrada de los trafos de PlanAlto y La Granja

Tipo: Conductores de aluminio cableados con núcleo de acero galvanizado (A.C.S.R/GA) con sección de aluminio de 2 AWG. Designación de fabricante Sparrow (2 ACSR).

Apoyos: Los apoyos de la línea de distribución lo conforman postes de concreto, estructuras metálicas y crucetería de diferentes disposiciones dependiendo del terreno, vuelo y necesidad.



*Figura 0-2. Subestación 33/13.2 kV*

En la Figura 0-3 se observan las derivaciones de la red de 13.2 kV que parten desde la Subestación hacia las áreas de **PlanAlto** y **La Granja**.



*Figura 0-3. Circuitos Redes de Distribución 13.2 kV*

## MODELO EQUIVALENTE SISTEMA DE 13.2 kV

Para realizar un estudio y análisis de estado estable y transitorio del sistema de potencia eléctrico, se hace necesario modelar los elementos del mismo, usando la teoría presente en el 0 se presenta a continuación los modelos equivalentes encontrados.

## LINEA DE DISTRIBUCIÓN 13.2 kV

Teniendo en cuenta que la red de distribución se divide en dos ramales principales q a su vez se reparte por los 5 transformadores que soportan las cargas de Cenicafé, se modela por secciones desde el punto A, a los puntos P1, P2, P3 y G1, G2. Con las siguientes características del conductor:

Tabla 0-1. Características Generales Conductor ACSR 2 AWG [4]

Calibre (AWG o MCM)	Designación	Núcleo de Alambres		Diámetro Nominal		Peso Aproximado			Carga de Rupura kN
		Aluminio	Acero	Núcleo (mm)	Cable (mm)	Aluminio kg/km	Acero kg/km	Cable kg/km	
2	Sparrow	6	1	2,7	8	92	44	136	12,7

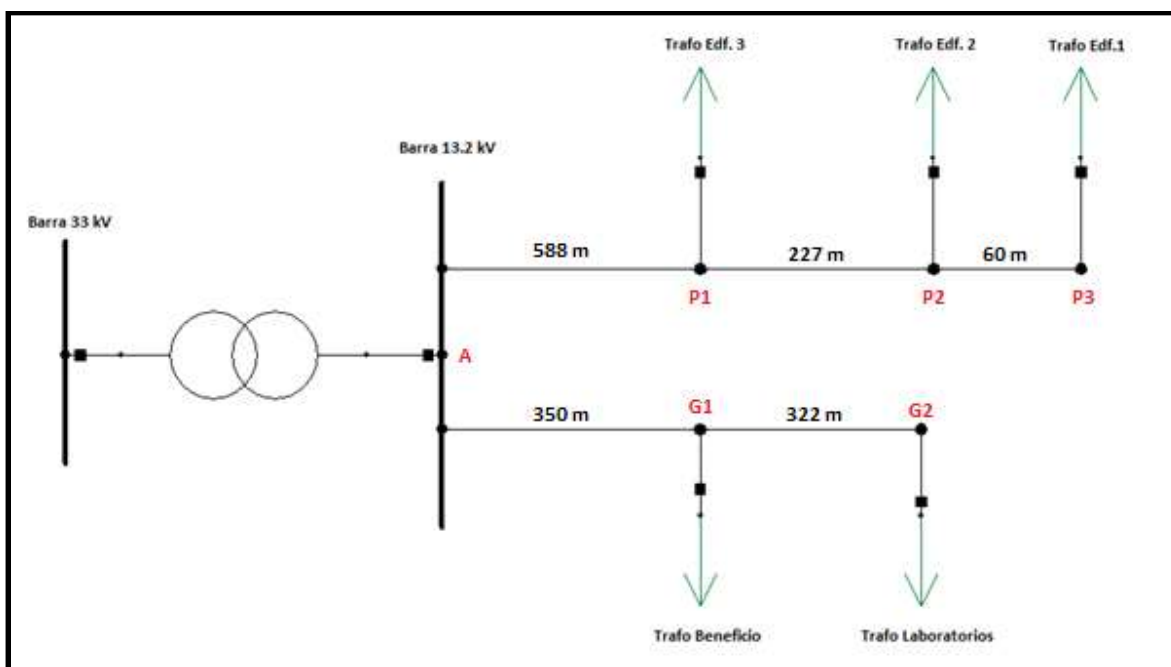
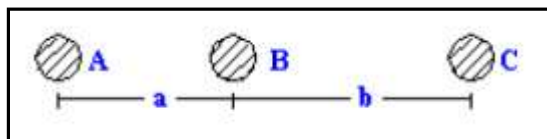


Figura 0-4. Diagrama de Distancias Líneas 13.2 kV

La red la componen 3 conductores monopoles aéreos. Se analiza como un sistema alineado trifásico sobre estructuras de apoyo de 12 m de altura y crucetería con separaciones entre conductores de:



$$a = 1600 \text{ mm}$$

$$b = 1300 \text{ mm}$$

El circuito equivalente para la línea de distribución correspondería a un sistema RL serie. Con los parámetros de línea:

*Resistencia Equivalente Secuencia 1 y 2*

La resistencia de corriente directa y alterna de conductores de aluminio 2 AWG tipo ACSR a 60 Hz se presenta en la Tabla 0-2 [4].

Tabla 0-2. Resistencia Directa y Alterna par Conductores de ACSR 2 [4]

Calibre (MCM)	Designación	Resistencia c.d $\Omega/\text{km}$	Resistencia c.a $\Omega/\text{km}$			
		20 °C	25 °C	50 °C	75 °C	
2	Sparrow	0,834	0.853	1,012	1,108	

Teniendo en cuenta las distancias de las secciones y asumiendo una temperatura del conductor a 50 °C, entonces:

$$\begin{aligned}
 R_{AP1}^{1,2} &= 1,012 \frac{\Omega}{\text{km}} * 0,588 \text{ km} = \mathbf{0,5951 \Omega} \\
 R_{P1P2}^{1,2} &= 1,012 \frac{\Omega}{\text{km}} * 0,227 \text{ km} = \mathbf{0,2297 \Omega} \\
 R_{P2P3}^{1,2} &= 1,012 \frac{\Omega}{\text{km}} * 0,06 \text{ km} = \mathbf{0,0607 \Omega} \\
 R_{AG1}^{1,2} &= 1,012 \frac{\Omega}{\text{km}} * 0,350 \text{ km} = \mathbf{0,3542 \Omega} \\
 R_{G1G2}^{1,2} &= 1,012 \frac{\Omega}{\text{km}} * 0,322 \text{ km} = \mathbf{0,3259 \Omega}
 \end{aligned}$$

**Datos de simulación para NEPLAN Y ATP**

*Reactancia Inductiva Equivalente Secuencia 1 y 2*

Referenciando las ecuaciones de la sección 0 se tiene que:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{DMG H}{RMG m}$$

$$x_L = 2\pi fL$$



RMG: Radio métrico geométrico.

DMG: Distancia media geométrica

El valor del RMG para el tipo de conductor usado en la línea de distribución es:

Tabla 0-3. RMG Conductor ACSR 2 AWG [4]

Calibre AWG o MCM	ACSR		RMG (mm)
	No. de Hilos		
	Acero	Al	
2	1	6	1.27406

La distancia media geométrica para la red trifásica con separaciones de  $a = 1600$  mm y  $b = 1300$  mm es:

DMG = 1820.345 mm, entonces.

Siendo:

$$X_L = 2\pi f \cdot 2 \times 10^{-7} \ln \frac{DMG}{RMG} \frac{\Omega}{m}$$

Reemplazando  $f=60$  Hz y pasando a logaritmos decimales:

$$X_L = 0.1736 \log \frac{DMG}{RMG} \frac{\Omega}{km}$$

$$X_L = 0,5477 \frac{\Omega}{km}$$

Al igual que para los cálculos de las resistencias, las reactancias inductivas se calculan por tramos

$$\begin{aligned} XL_{AP1}^{1,2} &= 0,5477 \frac{\Omega}{km} * 0,588 km = 0,3220 \Omega \\ XL_{P1P2}^{1,2} &= 0,5477 \frac{\Omega}{km} * 0,227 km = 0,1243 \Omega \\ XL_{P2P3}^{1,2} &= 0,5477 \frac{\Omega}{km} * 0,06 km = 0,0328 \Omega \\ XL_{AG1}^{1,2} &= 0,5477 \frac{\Omega}{km} * 0,350 km = 0,1917 \Omega \\ XL_{AP1}^{1,2} &= 0,5477 \frac{\Omega}{km} * 0,322 km = 0,1764 \Omega \end{aligned}$$

**Datos de Simulación para NEPLAN**

En unidades de inductancias resulta:

$$L = \frac{X_{Leq}}{2\pi f} \times 1000$$

$$L_{AP1} = 0,8543 \text{ mH}$$

$$L_{P1P2} = 0,3298 \text{ mH}$$

$$L_{P2P3} = 0,0872 \text{ mH}$$

$$L_{AG1} = 0,5085 \text{ mH}$$

$$L_{G1G2} = 0,4678 \text{ mH}$$

**Datos de Simulación para ATP**

### *Impedancia Equivalente de Secuencia 0*

La resistencia y reactancia de secuencia 0 es dependiente de la frecuencia  $f$  y las teorías de Carson y Polarek permiten calcular los parámetros con la siguiente ecuación:

$$Z_0 = (Rca + 3 * 10^{-3} * f) + j\omega * \left( 3 * 10^{-3} * 0,46 * \log \frac{700 * \sqrt{\rho/f}}{\sqrt[3]{\xi * r * Dm^2}} \right) \left[ \frac{\Omega}{km} \right]$$

Donde:

$Rca$  = Resistencia del conductor por fase ( $\Omega/km$ )

$\rho$  = Resistividad del terreno ( $\Omega/m$ ). Se asume 40  $\Omega/m$

$f$  = Frecuencia (Hz) siendo 60 H.

$r$  = Radio del conductor de fase (m)

$\xi$  = Coeficiente de haz; 0,78 para un conductor por fase.

La resistencia de secuencia cero sería:

$$R_0 = (1,012 + 3 * 10^{-3} * 2\pi 60)$$

$$R_0 = 1,5775 \Omega/km$$

Teniendo en cuenta la distancia:

$$R_{AP1}^0 = 1,5775 \frac{\Omega}{km} * 0,588 \text{ km} = \mathbf{0,9276 \Omega}$$

$$R_{P1P2}^0 = 1,5775 \frac{\Omega}{km} * 0,227 \text{ km} = \mathbf{0,3581 \Omega}$$

$$R_{P2P3}^0 = 1,5775 \frac{\Omega}{km} * 0,06 km = \mathbf{0,0946 \Omega}$$

$$R_{AG1}^0 = 1,5775 \frac{\Omega}{km} * 0,350 km = \mathbf{0,5521 \Omega}$$

$$R_{G1G2}^0 = 1,5775 \frac{\Omega}{km} * 0,322 km = \mathbf{0,5080 \Omega}$$

**Datos de Simulación para NEPLAN y ATP**

La reactancia inductiva de secuencia cero sería:

$$Xl_0 = 2\pi f * (3 * 10^{-3} * 0,46 * \log \frac{700 * \sqrt{40/f}}{\sqrt[3]{0,78 * (0,004) * (1,8203)^2}} \left[ \frac{\Omega}{km} \right]$$

$$Xl_0 = 0,8224 \left[ \frac{\Omega}{km} \right]$$

Teniendo en cuenta las distancias de las trayectorias:

$$XL_{AP1}^{1,2} = 0,8224 \frac{\Omega}{km} * 0,588 km = \mathbf{0,4836 \Omega}$$

$$XL_{P1P2}^{1,2} = 0,8224 \frac{\Omega}{km} * 0,227 km = \mathbf{0,1867 \Omega}$$

$$XL_{P2P3}^{1,2} = 0,8224 \frac{\Omega}{km} * 0,06 km = \mathbf{0,0493 \Omega}$$

$$XL_{AG1}^{1,2} = 0,8224 \frac{\Omega}{km} * 0,350 km = \mathbf{0,2878 \Omega}$$

$$XL_{AP1}^{1,2} = 0,8224 \frac{\Omega}{km} * 0,322 km = \mathbf{0,2648 \Omega}$$

**Datos de Simulación para  
NEPLAN**

En términos de inductancia sería:

$$L_{AP1} = 1,2828 mH$$

$$L_{P1P2} = 0,4952 mH$$

$$L_{P2P3} = 0,1309 mH$$

$$L_{AG1} = 0,7636 mH$$

$$L_{G1G2} = 0,7024 mH$$

**Datos de Simulación para ATP**

## TRANSFORMADORES 13.2 / 0.208 kV

De acuerdo con las placas características de los transformadores de potencia y las pruebas de cortocircuito y circuito abierto, se tienen los siguientes datos de los transformadores [7]:

Tabla 0-4. Transformador Edf. 1 (PlanAlto)

Relación de Transformación	S [MVA]	V <sub>H</sub> [kv]	V <sub>L</sub> [kv]	Z <sub>cc</sub> <sup>+0</sup> (%)	Grupo Vectorial	V <sub>tap</sub> (%)	Nom <sub>tap</sub>	Min <sub>tap</sub>	Max <sub>tap</sub>	Pos <sub>tap</sub>
13.2 kV / 214 kV	0,150	13.2	214	2.85	Dy5	2,5	0	-2	2	0

Tabla 0-5. Transformador Edf. 2 (PlanAlto)

Relación de Transformación	S [MVA]	V <sub>H</sub> [kv]	V <sub>L</sub> [kv]	Z <sub>cc</sub> <sup>+0</sup> (%)	Grupo Vectorial	V <sub>tap</sub> (%)	Nom <sub>tap</sub>	Min <sub>tap</sub>	Max <sub>tap</sub>	Pos <sub>tap</sub>
13.2 kV / 214 kV	0,150	13.2	214	2.73	Dy5	2,5	0	-2	2	0

Tabla 0-6. Transformador Edf. 3 (PlanAlto)

Relación de Transformación	S [MVA]	V <sub>H</sub> [kv]	V <sub>L</sub> [kv]	Z <sub>cc</sub> <sup>+0</sup> (%)	Grupo Vectorial	V <sub>tap</sub> (%)	Nom <sub>tap</sub>	Min <sub>tap</sub>	Max <sub>tap</sub>	Pos <sub>tap</sub>
13.2 kV / 214 kV	0,150	13.2	214	2.76	Dy5	2,5	0	-2	2	0

Tabla 0-7. Transformador Beneficio Agrícola (La Granja)

Relación de Transformación	S [MVA]	V <sub>H</sub> [kv]	V <sub>L</sub> [kv]	Z <sub>cc</sub> <sup>+0</sup> (%)	Grupo Vectorial	V <sub>tap</sub> (%)	Nom <sub>tap</sub>	Min <sub>tap</sub>	Max <sub>tap</sub>	Pos <sub>tap</sub>
13.2 kV / 214 kV	0,225	13.2	214	3.04	Dy5	2,5	0	-2	2	0

Tabla 0-8. Transformador Oficinas (La Granja)

Relación de Transformación	S [MVA]	V <sub>H</sub> [kv]	V <sub>L</sub> [kv]	Z <sub>cc</sub> <sup>+0</sup> (%)	Grupo Vectorial	V <sub>tap</sub> (%)	Nom <sub>tap</sub>	Min <sub>tap</sub>	Max <sub>tap</sub>	Pos <sub>tap</sub>
13.2 kV / 220 kV	0,1125	13.2	220	3	Dyn5	2,5	0	-2	2	0

**Nota:** Se asume para todos los transformadores una relación X/R = 10 %

## CARGAS EQUIVALENTES DE LADO DE BAJA

Las cargas equivalentes de los edificios se modelan de acuerdo con los resultados obtenidos con el estudio del 0, donde los valores de carga son encontrados con el análisis de los datos obtenidos por el analizador de red trifásico *Fluke 1735*.

Tabla 0-9. Cargas Equivalentes lado de baja tensión.

	Carga Equivalente
<b>Edificio 1</b>	$P = 26790.1 \text{ W}$ ; $Q = -347.2 \text{ VAR}$ ; $F.P = 0.98$
<b>Edificio 2</b>	$P = 20907.2 \text{ W}$ ; $Q = 8325.8 \text{ VAR}$ ; $F.P = 0.93$
<b>Edificio 3</b>	$P = 39082 \text{ W}$ ; $Q = 19225.7 \text{ VAR}$ ; $F.P = 0.897$
<b>Beneficio</b>	$P = 112.5 \text{ kW}$ ; $F.P = 0.85$
<b>Oficinas Granja</b>	$P = 56.25 \text{ kW}$ ; $F.P = 0.9$

**Nota:** Las cargas del Beneficio Agrícola y de las oficinas del sector de **La Granja** se asumen, dado que no fueron encontradas en el 0 porque estaban fuera del alcance de estudio.

## SIMULACIÓN Y ANÁLISIS

### Simulación de Estado Estable

Utilizando las herramientas de simulación de NEPLAN, se representa el sistema de potencia eléctrico como un conjunto entre la S/E Chinchiná que hace parte de operador de red CHEC y energiza la red de 33 kV de Cenicafé, hasta la S/E 33/13.2 kV de Cenicafé, que a su vez distribuye la energía a los transformadores de PlanAlto y La Granja. Resultando el modelo presentado en la Figura 0-5.

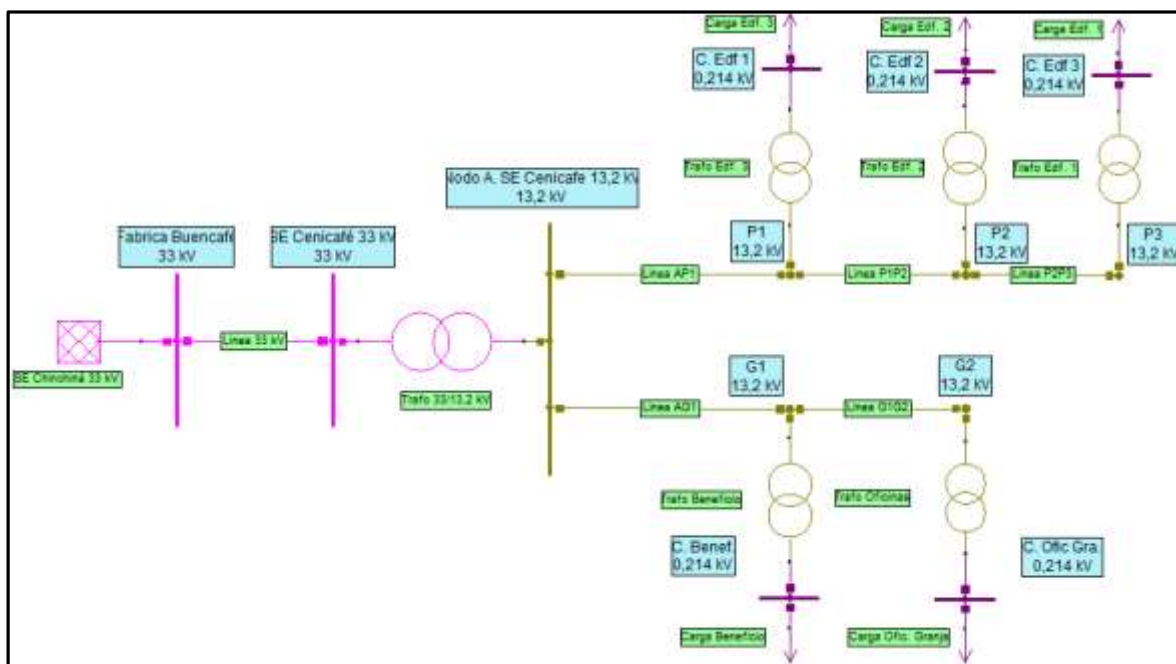


Figura 0-5. Modelo Equivalente NEPLAN S.P.E Completo

En la Tabla 0-10 se presenta un resumen de los resultados encontrados en el estudio de estado estable del caso base de trabajo (Donde  $V_{HV}$ ,  $S_{HV}$ ,  $PF_{HV}$  y  $V_{LV}$ ,  $S_{LV}$ ,  $PF_{LV}$  corresponden a los valores del lado de alta y de baja respectivamente).

Tabla 0-10. Resumen Resultados Estado Estable Caso Base Modelo 13.2 kV

	S/E Cenicafé	Edificio 1	Edificio 2	Edificio 3	Beneficio	Of. Granja
<b><math>V_{HV}</math> [kV]</b>	33,64	13,28	13,28	13,28	13,28	13,28
<b><math>S_{HV}</math> [kVA]</b>	289,45	26,8	22,53	43,7	133,62	62,73
<b><math>PF_{HV}</math></b>	0,881	1	0,92	0,89	0,84	0,89
<b><math>V_{LV}</math> [kV]</b>	13,27	0,215	0,214	0,214	0,213	0,214
<b><math>S_{LV}</math> [kVA]</b>	285,76	26,802	22,49	43,55	132,35	62,5
<b><math>PF_{LV}</math></b>	0,893	1	0,92	0,897	0,85	0,9

Adicionalmente se simula una variante del caso base, en el cual todas las cargas asociadas se aumentan en un 5% (se asume un leve incremento de la carga) para efectos de observar el comportamiento de la red en flujos de potencia. Donde se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 0-11 Resumen Resultados Estado Estable Variante Modelo 13.2 kV

	S/E Cenicafé	Edificio 1	Edificio 2	Edificio 3	Beneficio	Of. Granja
<b><math>V_{HV}</math> [kV]</b>	33,64	13,27	13,27	13,27	13,27	13,27
<b><math>S_{HV}</math> [kVA]</b>	304,17	28,13	23,62	45,9	140,37	65,87
<b><math>PF_{HV}</math></b>	0,882	1	0,93	0,89	0,84	0,89
<b><math>V_{LV}</math> [kV]</b>	13,27	0,215	0,214	0,214	0,213	0,214
<b><math>S_{LV}</math> [kVA]</b>	300,09	28,13	23,58	45,7	138,96	65,62
<b><math>PF_{LV}</math></b>	0,894	1	0,92	0,897	0,85	0,9

Como se observa en los resultados de las Tabla 0-10 y Tabla 0-11, el sistema de potencia permanece estable en cuanto a regulaciones de tensión sobre los nodos y cargabilidad de los transformadores de distribución, lo que permite concluir que Cenicafé cuenta con la capacidad suficiente para realizar ampliaciones de carga con su sistema actual.

## Simulación de Estado Transitorio

Con el estudio de estado transitorio se pretende analizar cuál es el efecto que se tiene sobre la tensión al realizar la apertura no controlada de los totalizadores del lado de baja tensión de cada una de las cargas de Cenicafé: Edificios 1, 2 y 3 y los circuitos 2 de “La Granja”.

En la Figura 0-6 se presenta el circuito equivalente en ATP para la simulación de estado transitorio.

En la Figura 0-7 se observa el resultado de simulación de estado transitorio, donde se evidencia el mismo comportamiento de sobretensión sobre los terminales del seccionador al realizar la apertura, (lastre de carga) encontrado en la sección 0,

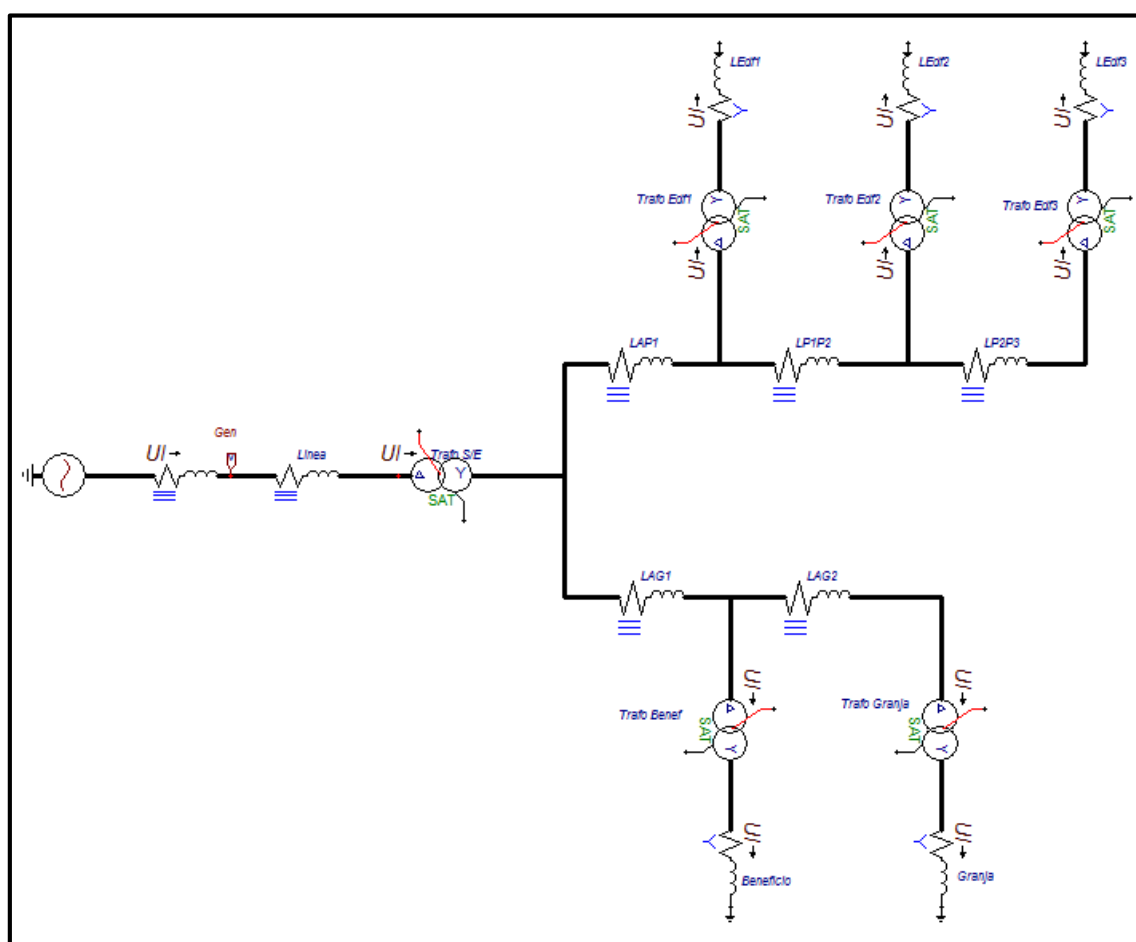


Figura 0-6. Modelo Equivalente ATP S.E.P Completo

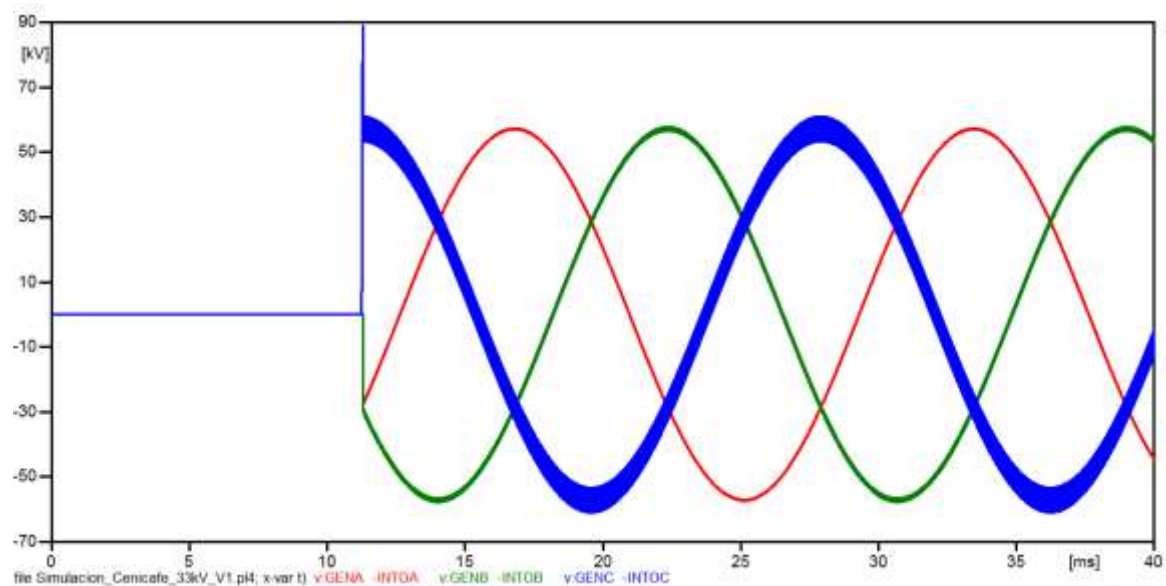


Figura 0-7. Simulación E.T Red Completa



## ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### CAPÍTULO 2

De acuerdo con los resultados de simulación en estado estable de la red de distribución de 33 kV y la carga equivalente de CENICAFÉ, no se evidencian problemas en regulaciones de tensión ni de capacidad del sistema, con capacidad suficiente para soportar la variabilidad y aumento de carga proyectados para los próximos años. Sin embargo, es importante resaltar que, teniendo en cuenta el método de modelado de la carga equivalente del usuario, se presentan niveles muy bajos en factor de potencia, lo que reafirma la problemática que se presenta por el consumo de reactivos en las empresa y la penalización económica que esta implica tener este tipo de comportamiento.

En cuanto al escenario ‘crítico’ evaluado para el TRV se encontraron tensiones transitorias del orden de 88 kV en su valor pico que corresponden a un 54% más que el voltaje pico de la onda de 33 kV RMS del sistema. Este escenario nos lleva a concluir dos puntos importantes para realizar una adecuada maniobra sobre este elemento. Primero, la capacidad del seccionador debe ser ajustada de tal forma que su funcionamiento no se degrade cuando se realice una maniobra de este tipo; segundo, teniendo en cuenta que el análisis se realizó con la intención de evidenciar el transitorio en el pico de tensión de una de las fases del sistema lo cual implica que su magnitud sea máxima, el hecho de tener cargas inductivas y capacitivas sobre el sistema, amplifican el efecto sobre este, es por esto que la segunda consideración para conservar la integridad de los elementos de la red y evitar fallas sobre la carga y el operador de red, se basa en que las operaciones que se realicen sobre la red de 33 kV se hagan con carga mínima, es decir, que todas las cargas de CENICAFÉ sean desenergizadas inicialmente en sus circuitos ramales de baja tensión antes de realizar la labor.

### CAPÍTULO 3

El análisis de las variables eléctricas para el estudio de caracterización de cargas, permite en un intervalo de tiempo determinar los comportamientos de las cargas equivalentes como lo son: Tensión típica de trabajo, corriente demandada, desbalanceo de cargas en las fases y variación de la demanda y la carga en el intervalo de tiempo. Dentro de los resultados encontrados en este capítulo se evidencian principalmente los siguientes puntos en común de las cargas equivalentes de los Edificios 1,2 y 3.

- Las tensiones de fase registradas se comportaron de forma estable durante los escenarios de demanda variable del intervalo muestreado; los niveles de tensión registrados en cada una de las celdas de carga, aseguran que la regulación de tensión del circuito ramal más lejano, sea tolerable para las cargas instaladas a éstos. Este punto es bastante favorable para la red y el desempeño de los equipos, teniendo en cuenta la naturaleza del tipo de dispositivos conectados a la red de Cenicafé (Equipos de instrumentación de alta sensibilidad).

- Producto de tener predominancia de cargas monofásicas instaladas a la red y la inadecuada práctica de agregar nuevos dispositivos sin verificar la cargabilidad de las fases, se manifiestan con el desbalance de cargas en las fases y corrientes de retorno sobre el neutro. Esta problemática junto con los armónicos en la red, produce en ocasiones altas corrientes sobre el conductor neutro que pueden degradar la capacidad del conductor de retorno si este no tiene la capacidad de corriente suficiente para transportar ésta.

Se recomienda para este problema, monitorear periódicamente las corrientes de fase y neutro para validar la gravedad del desbalance y evaluar un ejercicio de simetrización de cargas y verificar un punto de puesta a tierra para descargar estas corrientes circulantes que retornan a la fuente (en este caso el Transformador).

- La frecuencia de la red se comporta de manera estable y dentro de los parámetros recomendables para sistemas de distribución. A manera de conocer el desempeño en control de frecuencia del generador que se encuentra en la Subestación de Cenicafé, Podría evaluarse la posibilidad de realizar la medición en el caso en el cual la red este siendo energizada por esta fuente de respaldo.
- En cuanto a capacidad de carga de los transformadores, todos presentan cargabilidad menor al 70% en valores picos de demanda. Lo que permite valorar planes de expansión, considerando antes la capacidad de los conductores de los circuitos primarios y ramales.
- Además de determinar las cargas equivalentes de la red, los parámetros eléctricos analizados nos permiten evidenciar la eficiencia del sistema en cuanto a Calidad de la Energía, donde principalmente los dos valores que otorgan este tipo de información en este análisis son: El Factor de Potencia y las componentes armónicas de tensión y corriente.

Durante este proceso, se encontraron oportunidades de bajo factor de potencia en el edificio 3; por lo cual se recomienda evaluar un estudio del factor de potencia en diferentes escenarios de demanda y a diferentes horarios de operación, que permita evidenciar la real oportunidad y dimensionar un banco de condensadores para corregir esta problemática.

En cuanto a componentes armónicas de la red se vislumbra una mayor problemática en las componentes armónicas de corriente, siendo estas de esperar, teniendo en cuenta la predominante naturaleza electrónica de las cargas instaladas a la red. Este tipo de distorsión tiene en ocasiones efectos sobre el sistema tales como:

- Mal funcionamiento de algunos componentes y degradación de su vida útil.
- Problemas de disparos intempestivos de protecciones.
- Empeoramiento del factor de potencia.
- Otros.

Es por esto que estándares como [13] presentan recomendaciones para mitigar las implicaciones que se tienen con la presencia de distorsiones armónicas en la red, donde la herramienta más

completa pero a la vez más costosa para absorber las corrientes armónicas, es la instalación de filtros R-L-C. Estos filtros a su vez pueden tener la capacidad de realizar correcciones de factor de potencia a través de sus condensadores.

- Una de las principales oportunidades que se tiene al realizar el análisis de los parámetros eléctricos de los sistemas analizados, es la posibilidad de realizar un registro en un intervalo de tiempo mucho más amplio (por ejemplo un mes) y en diferentes momentos del año, teniendo en cuenta que la variación de la demanda puede cambiar en los meses en los cuales se tiene mayor producción de café (más muestras para analizar en equipos) y pudieran obtenerse resultados con algunas variaciones sobre los encontrados.
- Como futuros estudios en el registro de variables eléctricas enfocadas al entorno de calidad de la energía, podría considerarse analizar las cargas del sector de Cenicafé conocido como “La Granja”, donde se podrían llegar a tener una mayor oportunidad en Calidad de la Energía, teniendo en cuenta que la mayor contribución de demanda sobre este sistema lo dan las cargas inductivas que se encuentran en el proceso del Beneficio del Café, que se desarrolla en la disciplina de ingeniería Agrícola. Muchos de estos equipos están conectados a través de variadores de velocidad, arrancadores suaves y arranques directos.

El tener este tipo de información podría tenerse un panorama más amplio y real de las cargas más significativas que requieren un estudio más profundo en correcciones de factor de potencia y componentes armónicas de la red.

## CAPÍTULO 4

El objetivo principal del capítulo 4 consiste en recopilar la información de los 0 y 0 para realizar un modelo completo de la red hasta las cargas equivalente a baja tensión (208 V), con el fin de analizar con los estudios de estado estable y transitorio comportamientos más reales de las variables eléctricas de cada una de las cargas equivalentes de la red.

Al igual que como se comentó en los resultados del 0, una de las principales oportunidades que se tuvieron a la hora de realizar el modelo equivalente fue la falta de información que se tiene sobre las cargas equivalentes de la red de “La Granja” debido a que estas estaban fuera del alcance del estudio dado a que las condiciones de tiempo para el análisis fueron muy cortos, y que la infraestructura de la celda de carga de esta zona no se encontraba en las mejores condiciones para realizar la labor de forma segura para las personas y para el equipo de medición. Es por esto que se recomienda realizar trabajos de obras civiles y eléctricas sobre la subestación de “La Granja” para mejorar las condiciones operativas de la red y de sus equipos, y poder realizar el estudio sobre estas.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de estado estable del modelo equivalente se pueden resaltar los siguientes aspectos:

- Resumiendo en la siguiente tabla los valores encontrados en potencia y factor de potencia demandados por las cargas equivalentes de la red en Cenicafé (Lado baja tensión S/E Cenicafé), se tiene que para los modelos equivalentes de los 0 y 0 son:

*Tabla 0-1. P y FP S/E Cenicafé Modelos Capítulos 2 y 4*

	<b>S/E Cenicafé Modelo Cap 2</b>	<b>S/E Cenicafé Modelo Cap 4</b>
<b>V<sub>LV</sub> [kV]</b>	13,27	13,27
<b>S<sub>LV</sub> [kVA]</b>	177,2	285,76
<b>PF<sub>HV</sub></b>	0,6	0,89

Donde se puede notar una variación cerca del 60 % y 48% por encima, entre los valores de potencia y F.P respectivamente, encontrados en los modelos de 33 kV y 13kV. Esta variación puede llegar a suponer que alguno de los dos modelos esta fuera de la realidad, es por esto que se considera importante resaltar los siguientes aspectos de los modelos que pueden contribuir a tener este tipo de variaciones tan altas.

- El modelo del 0, se considera la carga como un todo del sistema, donde su equivalente se encuentra a través de la información de las Potencia Activa y Reactiva que se reportan en la facturación del mes de septiembre de 2014 (a nivel de 33 kV), lo que lo convierte en un modelo muy aproximado para entender el estado de la red. Por otro lado en el 0, las cargas de la red se descentralizaron entre los edificios 1, 2 y 3 de “Plan Alto” y las cargas del Beneficio y Oficinas de “La Granja”, lo que nos da una información más precisa sobre el comportamiento de cada una de las cargas.
- Las cargas de Plan Alto para el modelo del 0 fueron modeladas de acuerdo a la caracterización realizada en el 0, mientras que las cargas de La Granja fueron asumidas con valores de cargabilidad de los transformadores de la red de acuerdo a mediciones puntuales de estos, resaltando la importancia de conocer estos valores para poder llegar a tener un modelo equivalente mucho más real de las condiciones del sistema eléctrico.
- En el 0 se consideran los modelos equivalentes de la red de distribución de 13,2 kV y de los 5 transformadores de la red de 208 V, mientras que el modelo del 0 no tiene en cuenta este tipo de información para realizar el modelo de Estado Estable.

- Al realizar las simulaciones para los casos de escenarios de demanda base y Alto (5% más) no se evidencian problemáticas en regulaciones de tensión que puedan afectar la integridad de los equipos conectados a la red. Sin embargo, tanto en los modelos de los 0 y 0 se observan oportunidades en bajos factores de potencia en algunas cargas de la red.
- Teniendo en cuenta que la red principal de 33 kV de Cenicafé parte de la fábrica de BuenCafé Liofilizado y que aguas arriba de esta se encuentran más usuarios conectados como lo son La Trilladora de la cooperativa de Caficultores de Caldas y el circuito de respaldo de Buencafé, sería interesante observar el comportamiento de regulación de tensión de la red al modelar estos usuarios y el efecto transitorio que se tendría sobre la red al realizar una maniobra de desconexión sobre estos usuarios.

## DIFICULTADES DEL DESARROLLO

Durante la recopilación de información y el desarrollo del proyecto se tuvieron una serie de dificultades y oportunidades que llevaron a que el proceso del desarrollo de ésta tesis fuese lento y en ocasiones frustran, parte de las principales dificultades fueron:

- Al tratarse de una empresa en el cual el “Core” del negocio no está enfocado en estudiar el comportamiento de sus sistemas eléctricos, se pensó en un inicio que no se contaría con el apoyo de la empresa para participar el este proyecto. Pese a esto, con el apoyo del área de mantenimiento, se le mostró a la administración las oportunidades que tendrían al contar con la información resultante del estudio.
- No se tenía información de la cargabilidad de la red y sus transformadores, características de las cargas y perfil de demanda. Adicionalmente, en un inicio no se contaba con un equipo analizador de red para determinar las variables eléctricas de los usuarios y establecer la información que se requería para modelar el sistema. Sin embargo, con el apoyo del líder de mantenimiento se pudo conseguir este equipo y continuar con el estudio.
- La infraestructura del sistema eléctrico con una topología muy dispersa en las celdas de distribución hizo un poco complejo el estudio de caracterización de cargas, al tener que evaluar el comportamiento en diferentes puntos y en diferentes espacios de tiempo.
- Al no contarse con el espacio de realizar una maniobra de desconexión sobre las celdas de carga, la conexión del equipo analizador de red que se usó para desarrollar el 0 debió hacerse con energía en la fuente. Sin embargo, para esta labor se usaron los respectivos EPP's para realizar la actividad de modo seguro para el personal técnico encargado.
- Tratándose de un sistema de distribución antiguo, no se tenía información del control de cambios que se realizaron durante administraciones anteriores de la red de 33 kV y de las

características de sus apoyos y conductores. Fue necesario entonces, a través de los técnicos eléctricos más antiguos recopilar esta información para modelar el sistema.

- Parte de la información con la que se contó para el estudio, fueron los informes de contratistas externos que prestaron servicios de consultoría en el área de mantenimiento. Dichos informes contaban con información, conclusiones y recomendaciones para mejorar por ejemplo la resistividad de la malla de puesta a tierra de subestación 33/13 kV; sin embargo no se evidencia ni en bitácoras de trabajos, ni en informes de mantenimiento, que se hallan llevado a cabo las correcciones recomendadas en los informes.
- Como propuesta de desarrollo de ésta tesis, se consideró la evaluación del desempeño de la red de distribución de 33 y 13.2 kV ante el fenómeno de descargas eléctricas en la zona, donde su desarrollo se dificultó al no contar con la información de fallos en la red que permitiera correlacionar éstos con los rayos presentados.

## OPORTUNIDADES Y TRABAJOS FUTUROS

Antes del desarrollo de ésta tesis, el autor, en calidad de empleado de la compañía y como Ingeniero electricista, evidenció dentro de sus labores la falta de información del sistema eléctrico de potencia, que le permitiese enfocar sus esfuerzos en los puntos críticos del sistema que pudiesen tener más efecto en problemáticas como: bajo factor de potencia, componentes armónicas, desbalanceo de cargas, disparos intempestivos de protecciones, daño de equipos y otros fallos que afectaban continuamente la red, disminuyendo la confiabilidad y disponibilidad de la energía en la empresa. Es por esto que, con la intención de recopilar esta información, se realizaron una serie de estudios, simulaciones y modelos, que en resumen le permiten a Cenicafé y en general a cualquier tipo de empresa que tenga características similares en cuanto a razón social, contar con información como:

- Cargabilidad de su red de distribución 33 y 13.2 kV y sus modelos equivalentes.
- Cargabilidad de los transformadores de distribución y sus modelos equivalentes.
- Evidenciar la capacidad del sistema de distribución para la expansión de nuevas cargas, en diferentes escenarios de demanda.
- Simulaciones de estado estable y transitorio, con las que se pueden evaluar casos variantes en las cuales se quiera observar el comportamiento de los flujos de potencia en diferentes escenarios de demanda o el efecto transitorio que se tendría al realizar maniobras sobre la red y sus usuarios.
- El perfil de demanda y las cargas equivalentes de la red. Esta información permite determinar las características de las cargas en cuanto a desbalanceo, armónicos, factor de potencia, factor de utilización, demanda máxima, demanda promedio, etc.

- Evaluar proyectos de eficiencia energética en cuanto a iluminación, renovación tecnológica y energías alternativas, de acuerdo con los perfiles característicos de demanda encontrados en las cargas.

Sin embargo, a pesar que estos estudios aportan bastante información y dan un bosquejo del estado actual de Cenicafé, solo contextualizan sobre las principales oportunidades que tiene el sistema de distribución y los puntos en los cuales se debe enfocar para mejorar las condiciones de trabajo de la red en cuanto a confiabilidad y disponibilidad. Unos de los estudios o pasos a seguir que se recomiendan para continuar con este objetivo serían:

- Teniendo en cuenta que la red de distribución atraviesa zona urbana y rural en su mayor trayectoria, sería muy conveniente verificar la puesta a tierra y realizar mediciones de ésta en cada uno de sus apoyos, validando a su vez el correcto diseño de su sistema de apantallamiento.  
Este punto podría aportar en un alto porcentaje en la reducción de fallos provocados por fenómenos atmosféricos y fallas de corta duración.
- A su vez, es recomendable llevar junto con el anterior desarrollo, un histórico con los eventos de caídas y fluctuaciones de tensión que permitan como anteriormente se nombró, correlacionar las fallas con las descargas atmosféricas ocurridas en la zona.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en el 0 se tienen grandes oportunidades en:
  - Evaluar un proyecto de simetrización de cargas en las celdas de distribución de los Edificios 1, 2 y 3.
  - Realizar dentro de un espectro de tiempo más amplio el registro de las variables eléctricas del edificio 3, para determinar oportunidades en bajo factor de potencia.
  - Caracterización de cargas equivalentes de “La Granja” para modelar el sistema en condiciones más reales de operación.
  - Evaluar renovación tecnológica sobre los equipos de Aire comprimido y vacío que se encuentran instalados sobre la celda de carga del edificio 2, referenciados a los hallazgos de consumos de estos equipos.
- Como se nombró en la Sección 0, el estudio del desempeño de la red eléctrica de distribución ante el fenómeno del rayo, permitiría evidenciar oportunidades en su diseño para mantener la confiabilidad y disponibilidad de la red.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Ramirez Castaño, Redes de Distribución de Energía, Manizales: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2004.



- [2] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, Las Cruces, New Mexico: CRC Press, 2002.
- [3] L. Cardona, «Modelación de Redes de Transmisión de Energía Eléctrica,» Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín., Medellín, 2004.
- [4] CENTELSA, Cables de Energía y Telecomunicaciones S.A., «Conductores de Aluminio Desnudo ACSR».
- [5] J. C. Zapata Centeno, «Análisis de Líneas de Transmisión en Estado Permanente,» Universidad Veracruzana, Mendoza, 2012.
- [6] A. Salazar Gartner, «Linea 33 kV Liofilizado Cenicafé. Especificaciones Técnicas.,» Manizales., 1985.
- [7] MAGNETRON, ABB, INTECRI, «Pruebas eléctricas Transformadores Cenicafé,» Manizales.
- [8] NEPLAN, «Flujos de Carga,» de *Guía de Usuario*.
- [9] G. R. Estrada Villa, «Evaluación del Modelo de Arco Eléctrico para Estimar Niveles de Flicker,» Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Manizales, Caldas, Colombia, 2014.
- [10] J. J. Marulanda Durango , C. D. Sepúlveda Londoño y M. A. Álvarez López, «Estimación de los Parámetros de un Modelo de un Horno de Arco Eléctrico usando Máxima Verosimilitud,» Tecnológicas, Pereira, Risaralda, Colombia, 2012.
- [11] D. Landázuri, M. Rumipamba y L. Ruales, «Estudio y Propuesta de un Tipo de Interruptor a ser Implementado en La Línea de 500 kV mediante modelación en ATP,» Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica., Quito, Ecuador.
- [12] Fluke, «Fluke 1735 Three-Phase Power Quality Logger,» [En línea]. Available: <http://en-us.fluke.com/products/all-products/fluke-1735-power-quality.html>. [Último acceso: 10 Octubre 2016].
- [13] I. P. a. E. Society, «IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonics Control in Electric Power Systems.,» IEEE Standards Association, New York, 2014.
- [14] E. e. M. XM, «Confibilidad Sistemas de Potencia,» XM, 2008.
- [15] CENTELSA, Cables de Energia y Telecomunicaciones S.A., «Cables para Media Tensión,» *Cables & Tecnología*, 2008.

- [16] CENTELSA, Cables de Energía y Telecomunicaciones S.A., «RETIE: Regulación de Tensión en Instalaciones Eléctricas,» *Cables & Tecnología*, 2005.
- [17] S. Ramirez Castaño, Protección de Sistemas Eléctricos, Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales.
- [18] J. Castaño Estrada y H. F. Rodriguez Lozano, «Impacto de Modelos de Arco Eléctrico de un Interruptor de Potencia en un Sistema Eléctrico,» Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Risaralda, Colombia, 2015.
- [19] Comisión de Regulación de Energía y Gas, «Resolución 097,» *Ministerio de Minas y Energía*, 2008.
- [20] E. Perez, M. Paolone, A. Borghetti, C. A. Nucci, H. Torres y F. Rachidi, «ON THE COMPARISON BETWEEN EXPERIMENTAL RESULTS AND CALCULATIONS OF LIGHTNING-INDUCED VOLTAGES ON DISTRIBUTION SYSTEMS – EFFECT OF THE DISTRIBUTION NETWORK TOPOLOGY,» de *VIII International Symposium on Lightning Protection*, Sao Paulo, Brasil, 2005.
- [21] A. De Conti, E. Perez, E. Soto, F. Silveira, S. Visacro y H. Torres, «Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Distribution Lines Including Insulation Breakdown,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 25, nº 4, p. 3078, 2010.
- [22] E. Soto, E. Perez y C. Younes, «Influence of non-flat terrain on lightning induced voltages on distribution networks,» *Electric Power Systems Research*, 2014.
- [23] J. Blandón Díaz, «Consideraciones sobre el comportamiento de las líneas de distribución ante descargas Atmosféricas,» *GAMMA*, nº 13, 2005.
- [24] E. Perez, A. Delgadillo, D. Urrutia y H. Torres, «Optimizing the Surge Arresters Location for Improving Lightning Induced Voltage Performance of Distribution Network,» IEEE, Bogotá, Colombia, 2007.